

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАО ВО

«Сибирский федеральный университет»

институт

«Электроэнергетика»

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Г. Н. Чистяков

подпись инициалы, фамилия

« ____ » ____ 20 ____ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код – наименование направления

«Электропривод по системе ТВ–Г–Д с оптимальными обратными связями по
координатам объекта управления»

тема

Руководитель

подпись, дата

профессор, д.т.н.

должность, ученая степень

В.П.Кочетков

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

Н.В.Кадоркин

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

И.А.Кычакова

инициалы, фамилия

Абакан 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Математическое описание объекта управления системе ТВ–Г–Д	7
1.1 Электрическая часть электропривода ТВ–Г–Д	7
1.2 Механическая часть электропривода поворотного механизма экскаватора	11
1.2.1. Двух - и одномассовая электромеханическая система поворота экскаватора	14
2 Синтез систем с оптимальными обратными связями	21
2.1 Синтез комбинированной оптимальной системы управления с коррекцией питающего напряжения	26
2.2 Двухмассовая электромеханическая система	26
3 Исследование комбинированных оптимальных систем управления без учета допущений при синтезе	Ошибка! Закладка не определена.
Заключение	64
Список использованных источников	65
ПРИЛОЖЕНИЕ А	69
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	70

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Унифицированная структура экскаваторного электропривода В.И. Ключева, из всего многообразия используемых систем управления главными механизмами экскаваторов с электроприводами, в настоящее время нашла наибольшее применение. Данная система наиболее схожа с классической системой подчиненного регулирования (СПР) с определенными изменениями, так как принимают во внимание отличительные черты экскаваторного электропривода. Но применение традиционной СПР, первоначально спроектированной с целью применения в линейных одномассовых системах, никак не специализированно для электропривода с упругими связями.

Существенные дополнительные возможности усовершенствования процессов регулирования предоставляет применение комбинированного управления работой объекта, в котором сочетается последовательная коррекция внутренних координат и применение нелинейных методов синтеза регуляторов для внешних координат. Комбинированное управление может быть с переменной структурой, для коррекции внешних координат или иметь вид многосвязных систем. Применению данной теории для приводов экскаваторов направлены работы В.П. Кочеткова и его учеников [6, 7, 18–23].

Таким образом, вышесказанное определяет актуальность научно-технических задач, рассматриваемых в работе.

Цель работы: Ограничение динамических нагрузок автоматизированных электроприводов системы ТВ-Г-Д, для повышения производительности экскаваторов путем синтеза и исследования оптимальных обратных связей по координатам объекта управления.

Для достижения поставленной цели в работе решены **следующие задачи:**

1. Анализ основных элементов и способов управления электроприводов по системе ТВ-Г-Д.

2. Синтез систем управления электроприводами по системе ТВ-Г-Д с оптимальными обратными связями по координатам объекта управления.

3. Имитационное моделирование электропривода по системе ТВ-Г-Д с оптимальными обратными связями по координатам объекта управления.

Объект исследования – автоматизированный электропривод по системе ТВ-Г-Д.

Предмет исследования – ограничивающие нагрузку алгоритмы управления на основе оптимальных обратных связей по координатам объекта управления.

Методы исследования, используемые при решении задач в работе, основаны на теории электропривода, оптимального управления Летова-Калмана, последовательной коррекции Кесслера, комбинированного оптимального управления для решения задач синтеза систем управления электроприводом на основе работ Кочеткова, вычисления и компьютерного имитирования с использованием среды *MatLab Simulink*.

Практическая значимость работы:

1. Синтезированы системы управления электропривода по системе ТВ-Г-Д с оптимальными обратными связями по координатам объекта управления.

2. Разработаны модели для имитационного моделирования синтезированных электроприводов по системе ТВ-Г-Д с оптимальными обратными связями по координатам объекта управления.

3. Получены и проанализированы результаты моделирования электроприводов по системе ТВ-Г-Д с оптимальными обратными связями по координатам объекта управления.

Достоверность и обоснованность полученных результатов работы определяется обоснованностью принятых допущений, допустимой сходимостью выводов и результатов моделирования, полученных в работе с результатами физического эксперимента.

Общепринятым является выделение следующих структурных звеньев электрической части двухдвигательного электропривода поворота экскаватора:

- тиристорный возбудитель ТВ для питания обмотки возбуждения генератора;
- генератор Г, являющийся электромеханическим преобразователем, питающим электродвигатель Д;
- якорная цепь ЯЦ двигателя;

Электрическая часть двухдвигательного электропривода описывается одним уравнением, определяющим процессы в обмотке возбуждения генератора, и одним уравнением, описывающим процессы в якорной цепи [2].

Функциональная схема электромеханической системы ТВ-Г-Д будет иметь вид, представленный на рис.1.2:

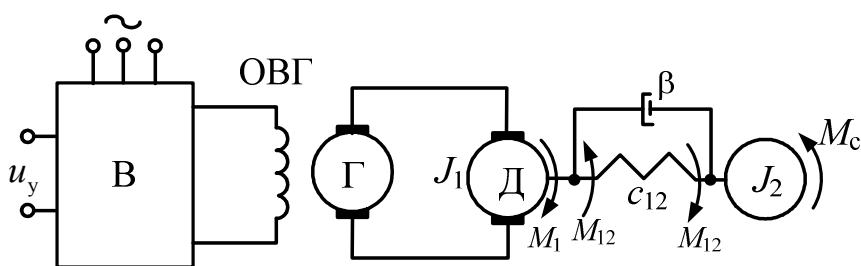


Рисунок. 1.2 – Функциональная схема двухмассовой ЭМС генератор – двигатель

Электрическая часть может быть описана при помощи баланса напряжений для цепи возбуждения генератора и якорной цепи в системе Г-Д [1, 3]. При этом сначала возбудитель генератора принимаются безынерционными с коэффициентами передачи соответственно K_v и K_n , пренебрегается гистерезисом, насыщением магнитной цепи, рассеянием потока и влиянием вихревых токов генератора.

С учетом перечисленных допущений математические описания электрической части будут иметь следующий вид для системы Г-Д :

$$\begin{cases} K_B u_y = i_B R_B + L_B \frac{di_B}{dt} \\ K_\Gamma i_B = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + C_e \omega_1 \end{cases}, \quad (1.1)$$

где $K_B u_y = u_B$, $K_\Gamma i_B = u_\Gamma$,

В канонической форме для системы Г-Д :

$$\begin{cases} \frac{di_B}{dt} = -\frac{R_B}{L_B} i_B + \frac{K_B}{L_B} u_y \\ \frac{di_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{C_e}{L_a} \omega_1 + \frac{K_\Gamma}{L_a} i_B \end{cases},$$

где u_y – напряжение управления; R_B – активное сопротивление обмотки возбуждения; i_B – ток возбуждения генератора; R_a – активное сопротивление якорной цепи; i_a – ток якорной цепи; C_e – электромагнитная конструктивная постоянная двигателя.

Остальные параметры вычисляются в соответствии со следующими выражениями:

Коэффициент передачи возбудителя:

$$K_B = U_B / U_{y.n},$$

где U_B – номинальное напряжение возбуждения генератора; $U_{y.n}$ – номинальное напряжение управления.

Индуктивность генератора при допущении линейности:

$$L_B = (p N_\Gamma \Phi_{\Gamma.n}) / I_{B.n},$$

где $p_{\text{а}}$ – число полюсов генератора; $N_{\text{а}}$ – число витков на полюсе генератора; $\Phi_{\text{г.н}}$ – номинальный поток полюса генератора; $I_{\text{в.н}}$ – номинальный ток возбуждения генератора.

Коэффициент передачи генератора:

$$K_{\text{г}} = U_{\text{г.н}} / I_{\text{в.н}},$$

где $U_{\text{г.н}}$ – номинальное напряжение генератора.

Активное сопротивление якорной цепи при системе Г-Д:

$$R_{\text{а}} = R_{\text{а.д}} + R_{\text{а.г}},$$

где $R_{\text{а.д}} = K_t (R_{\text{я.д}} + R_{\text{д.п.д}}) + R_{\text{щ.д}}$, $R_{\text{я.д}}$ – сопротивление якоря двигателя; $R_{\text{д.п.д}}$ – сопротивление дополнительных полюсов двигателя; $R_{\text{щ.д}} = 2 / I_{\text{д.н}}$ – сопротивление щеток двигателя; $I_{\text{д.н}}$ – номинальный ток двигателя, $R_{\text{а.г}} = K_t (R_{\text{я.г}} + R_{\text{д.п.г}} + R_{\text{к.о.г}}) + R_{\text{щ.г}}$, $R_{\text{я.г}}$ – сопротивление якоря генератора; $R_{\text{д.п.г}}$ – сопротивление дополнительных полюсов генератора; $R_{\text{щ.г}} = 2 / I_{\text{г.н}}$ – сопротивление щеток генератора; $I_{\text{г.н}}$ – номинальный ток генератора, $R_{\text{к.о.г}}$ – сопротивление компенсационной обмотки генератора [2].

Индуктивность якорной цепи при системе Г-Д:

$$L_{\text{а}} = 2L_{\text{а.д}} + L_{\text{а.г}},$$

где $L_{\text{а.д}} = 0,6 U_{\text{д.н}} / (p_{\text{д}} \omega_{\text{д.н}} I_{\text{а.д.н}})$ – индуктивность двигателя; $\omega_{\text{д.н}}$ – номинальная частота вращения двигателя; $p_{\text{д}}$ – число полюсов двигателя; $L_{\text{а.г}} = U_{\text{г.н}} / (p_{\text{г}} \omega_{\text{г.н}} I_{\text{г.н}})$ – индуктивность генератора; $U_{\text{г.н}}$ – номинальное

напряжение генератора; $\omega_{г.н}$ – номинальная частота вращения генератора; p_r – число полюсов генератора.

Конструктивная постоянная:

$$C = (U_{д.н} - I_{д.н} R_{a,д}) / \omega_{д.н} .$$

1.2 Механическая часть электропривода поворотного механизма экскаватора

Рассмотрим, например, кинематическую схему электропривода поворота экскаватора ЭКГ – 8 (рис. 1. 3). Аналогичную схему будут иметь экскаваторы ЭКГ-4.6, ЭКГ-5 и др. Здесь двигатели M_1 и M_2 через индивидуальные редукторы $P1$ и $P2$ приводят во вращение валы-шестерни ВШ1 и ВШ2, которые находятся в зацеплении с зубчатым венцом 3В, неподвижно закрепленным на базе Б (или на гусеничной тележке экскаватора). Валы - шестерни, обегая зубчатый венец, приводят во вращение поворотную платформу экскаватора П, опирающуюся на роликовый круг РК. Поворотная платформа соединена со стрелой, которая через рукоять соединена с ковшом (не показано на схеме).

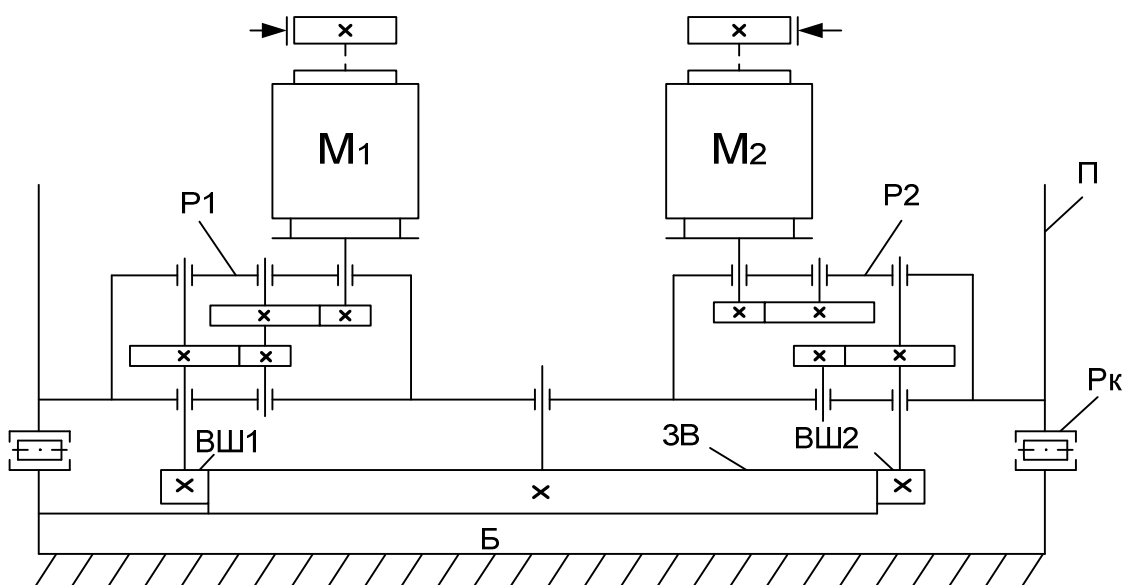


Рисунок 1.3 – Кинематическая схема механизма поворота

Расчет моментов инерции выполнен в [16] при помощи выражения:

$$J = GD^2 / k ,$$

где GD^2 - маховый момент, k - коэффициент, зависящий от конфигурации детали.

Далее моменты инерции всех элементов вращающихся кинематических звеньев приводятся к валу двигателя через квадрат передаточного числа. Затем определяются суммарные приведенные моменты инерции каждого двигателя и его редуктора J_{11} и J_{12} , а также суммарный приведенный момент инерции поворотной платформы со стрелой J_n и суммарный приведенный момент инерции рукояти, выдвинутой на полную длину, и ковша с грузом J_k .

Расчет жесткостей валов редуктора, стрелы и рукояти также выполнен в [16], в результате которого по рассчитанным жесткостям элементов кинематической схемы получаем значения эквивалентных жесткостей c_{12} и c_{23} . При выборе зазоров возникают колебания упругих моментов, что приводит в основном к разрушению венцовой шестерни. Поэтому ограничиваемся трехмассовой системой, что, $c_{23} = \infty$, а $J_2 = J_n + J_k$. Это существенно упрощает математическое описание, погрешность при этом не превышает 8% [15]. В результате имеем следующую расчетную схему двухдвигательного механизма поворота экскаватора, показанную на рис. 1. 4.

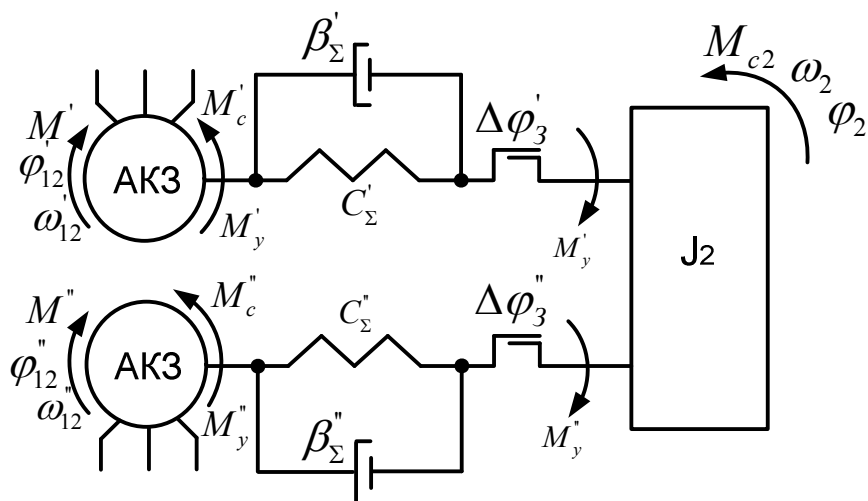


Рисунок 1.4 – Расчетная схема механизма поворота

Момент нагрузки электропривода определяется силами трения в двигателях (M_{c11} , M_{c12}) и в механизме (M_{c2}), ветровой нагрузкой и креном экскаватора (M_H). Однако с учетом всех факторов реальные статические нагрузки механизма поворота невелики и составляют около 10% от стопорного момента двигателя [7]. Основной нагрузкой электропривода являются силы инерции, действующие в переходных процессах пуска и торможения. В связи с этим пренебрегаем моментом статическим, что позволяет при незначительной потере точности более наглядно показать переходные процессы по упругим моментам.

В результате механическая часть двухдвигательного электропривода поворота описывается пятью уравнениями

$$\begin{cases} J_{11} d\omega_{11} / dt = M_1 - M_{y1}, \\ J_{12} d\omega_{12} / dt = M_2 - M_{y2}, \\ M_{y1} = c_{12}(\phi_{11} - \phi_2) + \beta_{12}(\omega_{11} - \omega_2), \\ M_{y2} = c_{12}(\phi_{12} - \phi_2) + \beta_{12}(\omega_{12} - \omega_2), \\ J_2 d\omega_2 / dt = M_{y1} + M_{y2}. \end{cases} \quad (1.2)$$

где M_1, M_2 - моменты двигателей; M_{y1}, M_{y2} - упругие моменты; $\varphi_{11}, \varphi_{12}$ - углы поворота двигателей; φ_1, φ_2 - угол поворота и угловая скорость механизма.

Заменяя два двигателя одним эквивалентным, получаем следующее математическое описание механической части двухдвигательного электропривода поворота экскаватора [13]:

$$\begin{cases} J_{1\Sigma} d\omega_{1\Sigma} / dt = M_{\Sigma} - M_{y\Sigma}, \\ M_{y\Sigma} = c_{12\Sigma}(\phi_{1\Sigma} - \phi_2) + \beta_{12\Sigma}(\omega_{1\Sigma} - \omega_2), \\ J_2 d\omega_2 / dt = M_{y\Sigma}. \end{cases}$$

Математическое описание механической части одномассовой системы имеет вид:

$$J_{\Sigma} d\omega_{\Sigma} / dt = M_{y\Sigma}$$

Таким образом в зависимости от целей исследования и степени упрощения механизм поворота экскаватора может быть представлен различными структурными схемами, которые соответствуют математическим моделям одно-, двух- или трёхмассовой систем.

1.2.1 Двух - и одномассовая электромеханическая система поворота экскаватора

Расчётная схема ЭМС поворота экскаватора с учётом (1.1) и (1.2) представлена на рис. 1. 5.

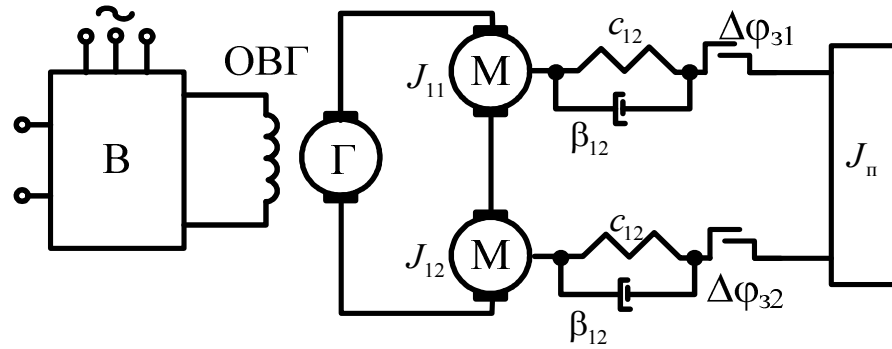


Рисунок 1.5 – Расчетная схема трёхмассовой ЭМС

Математическая модель трехмассовой системы без учета зазоров:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_B u_y = i_B R_B + L_B di_B / dt \\ K_{\Gamma} i_B = i_a R_a + L_a di_a / dt + C_e \omega_1 \\ J_{11} d\omega_{11} / dt = M_1 - M_{y1}, \\ J_{12} d\omega_{12} / dt = M_2 - M_{y2}, \\ M_{y1} = c_{12}(\phi_{11} - \phi_2) + \beta_{12}(\omega_{11} - \omega_2), \\ M_{y2} = c_{12}(\phi_{12} - \phi_2) + \beta_{12}(\omega_{12} - \omega_2), \\ J_2 d\omega_2 / dt = M_{y1} + M_{y2}. \end{array} \right. \quad (1.3)$$

Используя систему уравнений (1.3), построим структурную схему (рис. 1. 8) трехмассовой системы объекта управления. В схеме e_z , $T_z = L_B / R_B$ – ЭДС и постоянная времени генератора, $T_a = L_a / R_a$ – постоянная времени якорной цепи, C_E , C_M – коэффициенты пропорциональности между угловой скоростью и ЭДС, током и моментом двигателя (в системе единиц СИ $C = C_E = C_M$), $K_a = 1/R_a$. Динамические нагрузки механического оборудования в реальных условиях в значительной мере возрастают из-за ударов, возникающих при выборе зазоров в передачах [12,13]. При том зависимость упругого момента от разности углов поворота двигателя и механизма имеет вид звена нечувствительности, поэтому в схему введены соответствующие нелинейные элементы. В этом случае уравнения для упругих моментов имеют вид:

$$\begin{cases} M_{y1} = c_{12}(\phi_{11} - \phi_2 \pm \Delta\phi_{31} / 2) + \beta_{12}p(\phi_{11} - \phi \pm \Delta\phi_{31} / 2), \text{ при } |\phi_{11} - \phi_2| > \Delta\phi_{31} / 2, \\ M_{y1} = 0, \text{ при } |\phi_{11} - \phi_2| \leq \Delta\phi_{31} / 2, \\ M_{y2} = c_{12}(\phi_{12} - \phi_2 \pm \Delta\phi_{32} / 2) + \beta_{12}p(\phi_{12} - \phi_2 \pm \Delta\phi_{32} / 2), \text{ при } |\phi_{12} - \phi_2| > \Delta\phi_{32} / 2, \\ M_{y2} = 0, \text{ при } |\phi_{12} - \phi_2| \leq \Delta\phi_{32} / 2. \end{cases}$$

Для целей исследования, главным образом для синтеза регуляторов электропривода, для анализа поведения системы без учета зазоров, а также с одинаковыми зазорами в передачах целесообразно упростить ее до двух- и до одномассовой системы. Заменяя два двигателя одним эквивалентным, получаем следующую расчетную схему ЭМС механизма поворота одноковшового экскаватора (рис. 1. 6).

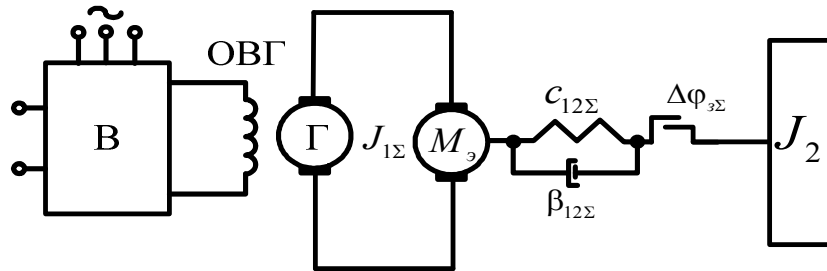


Рисунок. 1.6 – Расчётная схема двухмассовой ЭМС

Здесь $Mэ$ – эквивалентный двигатель, $J_{1\Sigma} = J_{11} + J_{12}$ – приведенный момент инерции эквивалентного двигателя с редуктором, $c_{12\Sigma} = 2c_{12\Sigma}$, $\beta_{12\Sigma} = 2\beta_{12\Sigma}$ – эквивалентная жесткость и коэффициент вязкого трения редуктора эквивалентного двигателя, $\Delta\varphi_3$ – зазор в передаче.

Несмотря на разнообразие схем основных механизмов экскаваторов лопат с индивидуальным приводом, полные расчетные схемы их как упругих динамических систем мало отличаются друг от друга и достаточно точно могут быть представлены двухмассовой системой [13, 16]. Для синтеза регуляторов электропривода и для анализа поведения системы без учета зазоров, а также с одинаковыми зазорами в передачах целесообразно использовать двух- и одномассовые системы рассмотренные выше [13, 14].

Математическое описание двухмассовой электромеханической системы с электроприводом по системе генератор–двигатель:

$$\begin{cases} \frac{di_B}{dt} = -\frac{R_B}{L_B}i_B + \frac{K_B}{L_B}u_y \\ \frac{di_a}{dt} = \frac{K_\Gamma}{L_a}i_B - \frac{R_a}{L_a}i_a - \frac{C_e}{L_a}\omega_1 \\ \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{C_M}{J_1}i_a - \frac{1}{J_1}M_y \\ \frac{dM_y}{dt} = c_{12}(\omega_1 - \omega_2) + \beta_{Б.Г}(\omega_1 - \omega_2) \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2}M_y - \frac{1}{J_2}M_c \end{cases} \quad (1.4)$$

Структурная схема двухмассовой системы объекта управления, описываемая системой уравнений (1.4), изображена на рисунке 1.7.

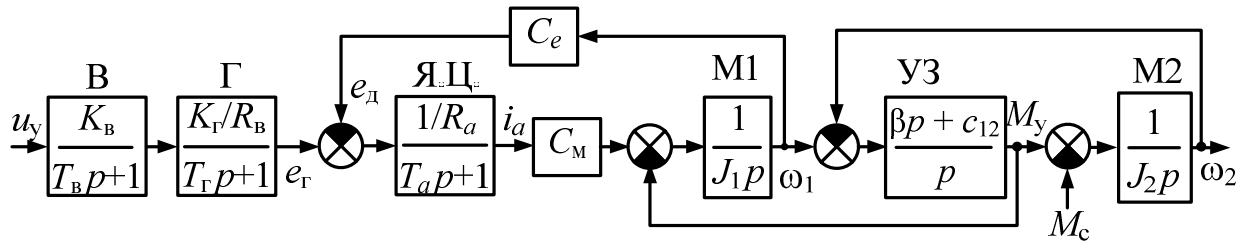


Рис. 1.7. Структурная схема двухмассовой ЭМС генератор–двигатель.

В схеме $C_M = C_e = C$, в системе СИ, $T_B = 0,01$ с – постоянная времени возбудителя генератора, $T_\Gamma = 0,005–0,01$ с – постоянная времени преобразователя, $T_\Gamma = \frac{L_B}{R_B}$ – постоянная времени возбуждения генератора,

$T_a = \frac{L_a}{R_a}$ – постоянная времени якорной цепи.

Часто при синтезе систем управления пренебрегают упругими связями в передачах и ЭМС рассматривают одномассовой. Математическая модель одномассовой системы типа Г-Д представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_B}{dt} = \frac{K_B}{L_B} u_y - \frac{R_B}{L_B} i_B \\ \frac{di_a}{dt} = \frac{K_\Gamma}{L_a} i_B - \frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{C_e}{L_a} \omega_\Sigma, \\ \frac{d\omega_\Sigma}{dt} = \frac{C_M}{J_\Sigma} i_a - \frac{1}{J_\Sigma} M_c \end{cases} \quad (1.5)$$

где ω_Σ – угловая скорость одномассовой системы, $J_\Sigma = J_1 + J_2$ – суммарный приведенный момент инерции.

Структурная схема одномассовой системы объекта управления, описываемая системой уравнений (1.5), изображена на рисунке 1.8.

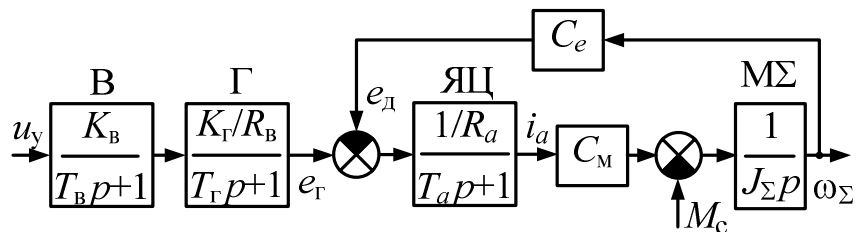


Рис.1.8. Структурная схема одномассовой ЭМС с электроприводом по системе генератор – двигатель

Для удобства исследования динамики представим математическую модель системы в относительных единицах, тогда координаты электропривода рассматриваются относительно их базовых значений. Для этого каждое звено умножим на входную базовую величину и разделим на выходную базовую величину. В качестве базовых для напряжений управления, возбуждения, якорной цепи, тока возбуждения, и угловых скоростей выбираем соответствующие номинальные значения. Для тока якорной цепи в качестве

базового принимаем максимальное (стопорное) значение тока якоря двигателя, для момента – максимальный суммарный момент всех двигателей.

В относительных единицах имеем: $K_B^* = \frac{K_B U_{y.б}}{U_{B.б}}$, $K_I^* = \frac{\hat{E}_I U_{\dot{a}.а}}{U_{a.а}}$, $K_r^* = 1$,

$$R_B^* = 1, \quad C_e^* = C_M^* = 1, \quad R_a^* = \frac{R_a I_{a.б}}{U_{a.б}}, \quad J_1^* = \frac{J_1 \omega_б}{M_б}, \quad c_{12}^* = \frac{c_{12} \omega_б}{M_б}, \quad J_2^* = \frac{J_2 \omega_б}{M_б}, \quad J_\Sigma^* = \frac{J_\Sigma \omega_б}{M_б}.$$

Все дальнейшие расчеты ведутся в относительных единицах, поэтому знак звездочки опускаем.

Часто при анализе и синтезе управления системы с несколькими выходными координатами и управляющими воздействиями удобно математическое описание представлять в векторно-матричной форме. Для этого в четвертое уравнение системы (1.2) и третье уравнение системы (1.3) подставим значения производных скоростей первой и второй массы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_B}{dt} = -\frac{1}{T_r} i_B + \frac{K_B R_B}{T_r} u_y \\ \frac{di_a}{dt} = \frac{K_r R_a}{T_a} i_B - \frac{1}{T_a} i_a - \frac{R_a C_e}{T_a} \omega_1 \\ \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{C_M}{J_1} i_a - \frac{1}{J_1} M_y \\ \frac{dM_y}{dt} = \frac{\beta_{B.T} C_M}{J_1} i_a + c_{12} \omega_1 - \beta_{B.T} \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} M_y - c_{12} \omega_2 \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2} M_y - \frac{1}{J_2} M_c \end{array} \right.$$

Таким образом, математическое описание экскаваторного электропривода в векторно-матричной форме будет иметь вид:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{bu} + \mathbf{df},$$

где $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ – n -мерный вектор состояния системы, u – управление, f – возмущение (M_c) \mathbf{A} – $n \times n$ -мерная матрица коэффициентов ЭМС, \mathbf{b} – матрица-вектор коэффициентов при управлении размера $n \times 1$, \mathbf{d} – матрица-вектор коэффициентов при возмущении размера $n \times 1$

Для двухмассовой ЭМС:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_B \\ i_a \\ \omega_1 \\ M_y \\ \omega_2 \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_r} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_r R_a}{T_a} & -\frac{1}{T_a} & -\frac{C_e R_a}{T_a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_M}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 \\ 0 & \frac{\beta_{B.T} C_M}{J_1} & c_{12} & \beta_{B.T} \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} & c_{12} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \frac{K_B R_B}{T_r} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J_2} \end{bmatrix}^0.$$

для одномассовой ЭМС:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_B \\ i_a \\ \omega_1 \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_r} & 0 & 0 \\ \frac{K_r R_a}{T_a} & -\frac{1}{T_a} & -\frac{C_e R_a}{T_a} \\ 0 & \frac{C_M}{J_\Sigma} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \frac{K_a R_a}{T_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J_\Sigma} \end{bmatrix}.$$

Таким образом, в зависимости от целей исследования и степени упрощения механизм поворота экскаватора может быть представлен различными структурными схемами, которые соответствуют математическим моделям одно-, двух- или трехмассовой систем.

2 Синтез систем с оптимальными обратными связями

Комбинированные оптимальные системы управления могут быть с коррекцией первой; первой и второй; первой, второй и третьей внутренних координат объекта управления. Внутренними координатами электропривода по системе тиристорный возбудитель – генератор – двигатель (ТВ – Г – Д), который широко применяется для объектов горной промышленности, являются соответственно ток возбуждения генератора (питающее напряжение генератора), ток якорной цепи и скорость двигателя.

Рассмотрим математическое описание двухмассовой электромеханической системы (ЭМС) с электроприводом типа ТВ – Г – Д с учетом только координат, а также при введении различных производных координат. Координатами ЭМС являются: токи возбуждения генератора и якорной цепи, скорости двигателя и второй массы и упругий момент. Математическое описание двухмассовой ЭМС состоит из системы пяти дифференциальных уравнений первого порядка и представляет модель объекта управления. Во всех остальных случаях, когда математическое описание ЭМС состоит из системы больше или меньше пяти дифференциальных уравнений первого порядка, это описание представляет модель объекта регулирования [5].

Введем контур питающего напряжения, структурная схема которого приведена на рисунок 2.1.

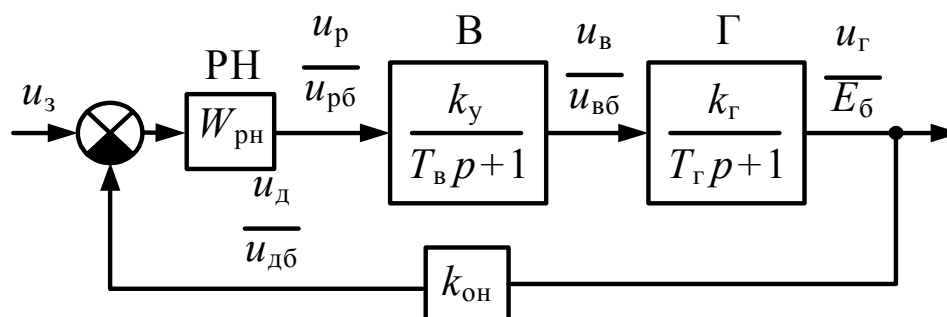


Рисунок 2.1 – Структурная схема контура питающего напряжения

По методике расчета на “технический оптимум” определим передаточную функцию регулятора питающего напряжения, приравнивая желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура питающего напряжения

$$\frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)} = W_{\text{рн}}(p)W_{\text{в}}(p)W_{\text{г}}(p)k_{\text{он}},$$

где $W_{\text{рн}}(p)$, $W_{\text{в}}(p)$, $W_{\text{г}}(p)$ – передаточные функции соответственно регулятора питающего напряжения, возбудителя, генератора;

$k_{\text{он}}$ – коэффициент передачи датчика питающего напряжения;

T_{μ} – некомпенсируемая постоянная времени;

$k_{\text{в}}$, $k_{\text{г}}$ – коэффициенты усиления тиристорного возбудителя и генератора. Таким образом, для системы ТВ – Г – Д получаем ПИ-регулятор питающего напряжения. Разделив и умножив каждое звено соответственно на выходную и входную базовые величины, получим передаточные функции всех звеньев контура питающего напряжения в относительных единицах. Передаточная функция замкнутого контура питающего напряжения

$$W_{\text{зпн}}(p) = \frac{1/k_{\text{он}}}{2T_{\mu}p+1}.$$

При пренебрежении некомпенсируемой постоянной времени

$$W_{\text{зпн}}(p) = \frac{1}{K_{\text{он}}} = K_{\text{н}}.$$

Двухмассовую электромеханическую систему (ЭМС) представим в виде расчетной схемы (рисунок 2.2).

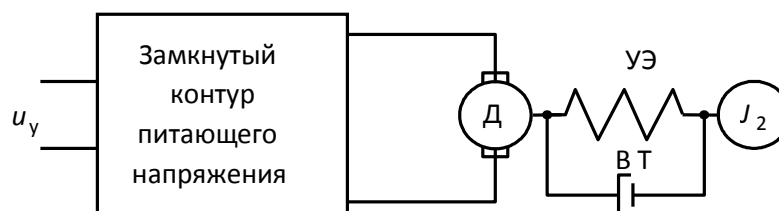


Рисунок 2.2 – Расчетная схема двухмассовой ЭМС

Математическое описание ЭМС с коррекцией питающего напряжения может быть представлено в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a}i_a - \frac{C}{L_a}\omega_1 + \frac{k_H^*}{L_a}u_y^*, \\ \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{C}{J_1}i_a - \frac{1}{J_1}M, \\ \frac{dM}{dt} = C_{12}(\omega_1 - \omega_2) + \beta_{\text{вт}}(\omega_1' - \omega_2'), \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2}M. \end{array} \right. \quad (2.1)$$

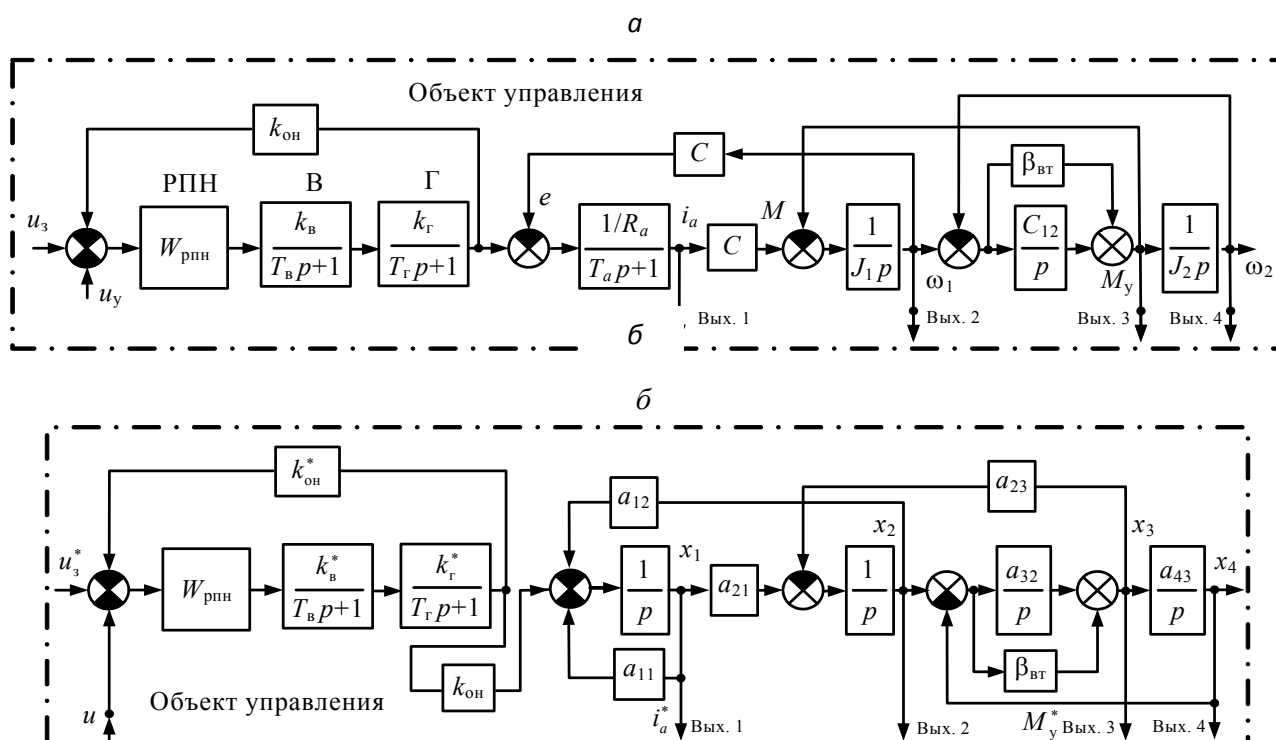


Рисунок 2.3 – Структурная схема объекта управления:

а – в абсолютных единицах; б – в относительных единицах

Структурная схема объекта управления в соответствии с системой уравнений (2.1) с контуром питающего напряжения представлена на рисунок 2.3.

$$\begin{cases} \frac{di_a^*}{dt} = -\frac{1}{T_a} i_a^* - \frac{c\omega_\delta}{L_a I_{a\delta}} \omega_a^* + \frac{k_H u_{y\delta}}{L_a I_{a\delta}} u_y^*, \\ \frac{d\omega_1^*}{dt} = \frac{cI_{a\delta}}{J_1 \omega_\delta} i_a^* - \frac{M_\delta}{J_1 \omega_\delta} M_y^*, \\ \frac{dM_y^*}{dt} = \frac{c_{12}\omega_\delta}{M_\delta} (\omega_1^* - \omega_2^*) + \beta_{\text{вт}} \frac{\omega_\delta'}{M_\delta} (\omega_1'^* - \omega_2'^*), \\ \frac{d\omega_2^*}{dt} = \frac{M_\delta}{J_2 \omega_\delta} M_y^*, \quad \beta_{\text{вт}}' = \frac{\beta_{\text{вт}} \omega_\delta'}{M_\delta}. \end{cases}$$

В относительных единицах электромеханическую систему описывают уравнениями (2.2)

$$\begin{cases} x_1' = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + bu, \\ x_2' = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ x_3' = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ x_4' = a_{43}x_3. \end{cases} \quad (2.2)$$

где a_{ij} – коэффициенты при координатах, выраженные в реальном масштабе времени, в отличие от рассмотренных ранее; x_1, x_2, x_3, x_4 – соответственно ток якорной цепи, скорость двигателя, упругий момент и скорость второй массы в относительных единицах; u – управляющее воздействие [17].

Если информация имеется только об электрических параметрах, то электромеханическую систему рассматривают как одномассовую. В этом случае, пренебрегая некомпенсируемыми постоянными времени в контуре

питающего напряжения, математическое описание электромеханической системы представляют в виде

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{c}{L_a} \omega_1 + \frac{k_H}{L_a} u_y, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{c}{J_2} i_a. \end{cases}$$

Умножив и разделив все переменные на их базовые величины, получим

$$\begin{cases} \frac{di_a^*}{dt} = -\frac{1}{T_a} i_a^* - \frac{c\omega_\delta}{L_a I_{a\delta}} \omega^* + \frac{k_H u_{y\delta}}{L_a I_{a\delta}} u_y^*, \\ \frac{d\omega^*}{dt} = \frac{c I_{a\delta}}{J_2 \omega_\delta} i_a^*. \end{cases}$$

В формализованном виде математическое описание одномассовой электромеханической системы представим в виде уравнений (2.3)

$$\begin{cases} x_1' = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u, \\ x_2' = a_{21}^0 x_1, \end{cases} \quad (2.3)$$

Рассмотрим математическое описание электромеханической системы при введении дополнительных координат: x_5 , x_6 , x_7 и x_8 - производных соответственно тока якорной цепи, скорости двигателя, упругого момента и скорости второй массы [18]:

$$x_1' = x_5, \quad x_2' = x_6, \quad x_3' = x_7, \quad x_4' = x_8,$$

при различном сочетании этих производных.

2.1 Синтез комбинированной оптимальной системы управления с коррекцией питающего напряжения

Рассмотрим объект регулирования в виде одномассовой электромеханической системы, описываемой системой уравнений (2.3)

$$\begin{cases} x_1' = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u, \\ x_2' = a_{21}^0 x_1, \end{cases}$$

При наличии полной информации о координатах двухмассовой электромеханической системы с коррекцией питающего напряжения математическое описание системы, в соответствии с (2.2) имеет вид:

$$\begin{cases} x_1' = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u, \\ x_2' = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ x_3' = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ x_4' = a_{43}x_3. \end{cases}$$

2.2 Двухмассовая электромеханическая система

Рассмотрим в качестве исходной двухмассовую электромеханическую систему, описанную системой уравнений (2.2)

$$\begin{cases} x_1' = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u, \\ x_2' = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ x_3' = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ x_4' = a_{43}x_3. \end{cases}$$

Вводим пятую координату x_5

Берем производную пятой координаты, получим:

$$\begin{aligned}x_5' &= -a_{11}x_1' - a_{12}x_2' + b_k u', \\x_5' &= -a_{11}x_5 - a_{12}a_{21}x_1 + a_{12}a_{23}x_3 + b_k u_2,\end{aligned}$$

$$x_5' = -a_{51}x_1 + a_{53}x_3 - a_{55}x_5 + b_k u_2,$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{55} = a_{11}, \quad a_{51} = a_{12}a_{21}, \quad a_{53} = a_{12}a_{23}, \quad u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t).$$

В результате, математическое описание электромеханической системы, обозначенное системой уравнений (2.2), с учетом производной по току якорной цепи, примет вид:

$$\begin{cases} x_1' = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u_1, \\ x_2' = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ x_3' = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ x_4' = a_{43}x_3, \\ x_5' = -a_{51}x_1 + a_{53}x_3 - a_{55}x_5 + b_k u_2. \end{cases} \quad (2.4)$$

Вводим шестую координату x_6

Возьмем производную шестой координаты, получим:

$$x_6' = a_{21}x_1' - a_{23}x_3',$$

$$\begin{aligned}
x_6' &= -a_{21}a_{11}x_1 - a_{21}a_{12}x_2 + a_{21}b_k u - a_{23}a_{31}x_1 - a_{23}a_{32}x_2 + a_{23}a_{33}x_3 + a_{23}a_{34}x_4, \\
x_6' &= -(a_{23}a_{31} + a_{21}a_{11})x_1 - (a_{21}a_{12} + a_{23}a_{32})x_2 + a_{23}a_{33}x_3 + a_{23}a_{34}x_4 + a_{21}b_k u, \\
x_6' &= -a_{61}x_1 - a_{62}x_2 + a_{63}x_3 + a_{64}x_4 + b_{k1}u,
\end{aligned}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{61} = a_{23}a_{31} + a_{21}a_{11}, \quad a_{62} = a_{21}a_{12} + a_{23}a_{32}, \quad a_{63} = a_{23}a_{33}, \quad a_{64} = a_{23}a_{34}, \quad b_{k1} = a_{21}b_k.$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производной по скорости двигателя примет вид:

$$\begin{cases}
x_1' = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u, \\
x_2' = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\
x_3' = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\
x_4' = a_{43}x_3, \\
x_6' = -a_{61}x_1 - a_{62}x_2 + a_{63}x_3 + a_{64}x_4 + b_{k1}u.
\end{cases} \quad (2.5)$$

Вводим седьмую координату x_7

Возьмем производную седьмой координаты:

$$x_7' = a_{31}x_1' + a_{32}x_2' - a_{33}x_3' - a_{34}x_4',$$

$$\begin{aligned}
x_7' &= -a_{31}a_{11}x_1 - a_{31}a_{12}x_2 + a_{31}b_k u + a_{32}a_{21}x_1 - a_{32}a_{23}x_3 - a_{33}x_7 - a_{34}a_{43}x_3, \\
x_7' &= (-a_{31}a_{11} + a_{32}a_{21})x_1 - a_{31}a_{12}x_2 - (a_{32}a_{23} + a_{34}a_{43})x_3 - a_{33}x_7 + a_{31}b_k u,
\end{aligned}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{71} = -a_{31}a_{11} + a_{32}a_{21}, \quad a_{72} = a_{31}a_{12}, \quad a_{73} = a_{32}a_{23} + a_{34}a_{43}, \quad a_{77} = a_{33}, \quad b_{k1} = a_{31}b_k.$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производной по упругому моменту:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_7 = -a_{71}x_1 - a_{72}x_2 - a_{73}x_3 - a_{77}x_7 + b_{k1}u. \end{cases} \quad (2.6)$$

Вводим восьмую координату x_8

Возьмем производную восьмой координаты:

$$\dot{x}_8 = a_{43}\dot{x}_3,$$

$$\dot{x}_8 = a_{43}a_{31}x_1 + a_{43}a_{32}x_2 - a_{43}a_{33}x_3 - a_{43}a_{34}x_4,$$

$$\dot{x}_8 = a_{81}x_1 + a_{82}x_2 - a_{83}x_3 - a_{84}x_4$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{81} = a_{43}a_{31}, \quad a_{82} = a_{43}a_{32}, \quad a_{83} = a_{43}a_{33}, \quad a_{84} = a_{43}a_{34}.$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производной по скорости второй массы при этом:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_8 = a_{81}x_1 + a_{82}x_2 - a_{83}x_3 - a_{84}x_4. \end{cases} \quad (2.7)$$

Вводим пятую x_5 и шестую x_6 координаты

Вводим одновременно и пятую ($x'_1 = x_5$) и шестую ($x'_2 = x_6$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} \dot{x}'_5 = -a_{11}x'_1 - a_{12}x'_2 + b_k u', \\ \dot{x}'_6 = a_{21}x'_1 - a_{23}x'_3. \end{cases}, \quad \begin{cases} \dot{x}'_5 = -a_{11}x_5 - a_{12}x_6 + b_k u_2, \\ \dot{x}'_6 = a_{21}x_5 - a_{23}a_{31}x_1 - a_{23}a_{32}x_2 + a_{23}a_{33}x_3 + a_{23}a_{34}x_4. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}'_5 = -a_{55}x_5 - a_{56}x_6 + b_k u_2, \\ \dot{x}'_6 = -a_{61}x_1 - a_{62}x_2 + a_{63}x_3 + a_{64}x_4 + a_{65}x_5. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{55} = a_{11}, \quad a_{56} = a_{12}, \quad a_{61} = a_{23}a_{31}, \quad a_{62} = a_{23}a_{32}, \quad a_{63} = a_{23}a_{33}, \quad a_{64} = a_{23}a_{34}, \quad a_{65} = a_{21},$$

$$u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t).$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных и по скорости двигателя и по току якорной цепи примет вид:

$$\begin{cases} x_1' = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u_1, \\ x_2' = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ x_3' = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ x_4' = a_{43}x_3, \\ x_5' = -a_{55}x_5 - a_{56}x_6 + b_k u_2, \\ x_6' = -a_{61}x_1 - a_{62}x_2 + a_{63}x_3 + a_{64}x_4 + a_{65}x_5. \end{cases} \quad (2.8)$$

Вводим седьмую x_7 и восьмую x_8 координаты

Вводим одновременно и седьмую ($x_3' = x_7$) и восьмую ($x_4' = x_8$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} x_7' = a_{31}x_1' + a_{32}x_2' - a_{33}x_3' - a_{34}x_4' \\ x_8' = a_{43}x_3' \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_7' = -a_{31}a_{11}x_1 - a_{31}a_{12}x_2 + a_{31}b_k u + a_{32}a_{21}x_1 - a_{32}a_{23}x_3 - a_{33}x_7 - a_{34}x_8, \\ x_8' = a_{43}x_7. \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_7' = (-a_{31}a_{11} + a_{32}a_{21})x_1 - a_{31}a_{12}x_2 - a_{32}a_{23}x_3 - a_{33}x_7 - a_{34}x_8 + a_{31}b_k u \\ x_8' = a_{43}x_7. \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_7' = a_{71}x_1 - a_{72}x_2 - a_{73}x_3 - a_{77}x_7 - a_{78}x_8 + b_{k1}u \\ x_8' = a_{87}x_7. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{71} = a_{32}a_{21} - a_{31}a_{11}, \quad a_{72} = a_{31}a_{12}, \quad a_{73} = a_{32}a_{23}, \quad a_{77} = a_{33}, \quad a_{78} = a_{34}, \quad a_{87} = a_{43}, \\ b_{k1} = a_{31}b_k.$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных и по упругому моменту и скорости второй массы примет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_K u, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_7 = a_{71}x_1 - a_{72}x_2 - a_{73}x_3 - a_{77}x_7 - a_{78}x_8 + b_{K1}u, \\ \dot{x}_8 = a_{87}x_7. \end{cases} \quad (2.9)$$

Вводим пятую x_5 и седьмую x_7 координаты

Вводим одновременно и пятую ($x'_1 = x_5$) и седьмую ($x'_3 = x_7$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} \dot{x}'_5 = -a_{11}\dot{x}'_1 - a_{12}\dot{x}'_2 + b_k \dot{u}', \\ \dot{x}'_7 = a_{31}\dot{x}'_1 + a_{32}\dot{x}'_2 - a_{33}\dot{x}'_3 - a_{34}\dot{x}'_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}'_5 = -a_{11}x_5 - a_{12}a_{21}x_1 + a_{12}a_{23}x_3 + b_k u', \\ \dot{x}'_7 = a_{31}x_5 + a_{32}a_{21}x_1 - a_{32}a_{23}x_3 - a_{33}x_7 - a_{34}a_{43}x_3, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}'_5 = -a_{12}a_{21}x_1 + a_{12}a_{23}x_3 - a_{11}x_5 + b_k u', \\ \dot{x}'_7 = a_{32}a_{21}x_1 - (a_{32}a_{23} + a_{34}a_{43})x_3 - a_{31}x_5 - a_{33}x_7. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}'_5 = -a_{51}x_1 + a_{53}x_3 - a_{55}x_5 + b_k u_2, \\ \dot{x}'_7 = a_{71}x_1 - a_{73}x_3 - a_{75}x_5 - a_{77}x_7. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{51} = a_{12}a_{21}, \quad a_{53} = a_{12}a_{23}, \quad a_{55} = a_{11}, \quad u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t),$$

$$a_{71} = a_{32}a_{21}, \quad a_{73} = a_{32}a_{23} + a_{34}a_{43}, \quad a_{75} = a_{31}, \quad a_{77} = a_{33}.$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных и по току якорной цепи и упругому моменту примет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u_1, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_5 = -a_{51}x_1 + a_{53}x_3 - a_{55}x_5 + b_k u_2, \\ \dot{x}_7 = a_{71}x_1 - a_{73}x_3 - a_{75}x_5 - a_{77}x_7. \end{cases} \quad (2.10)$$

Вводим шестую x_6 и восьмую x_8 координаты

Вводим одновременно и шестую ($x'_2 = x_6$) и восьмую ($x'_4 = x_8$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} \dot{x}_6 = a_{21}\dot{x}_1 - a_{23}\dot{x}_3, \\ \dot{x}_8 = a_{43}\dot{x}_3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_6 = -a_{21}a_{11}x_1 - a_{21}a_{12}x_2 + a_{21}b_k u - a_{23}a_{31}x_1 - a_{23}a_{32}x_2 + a_{23}a_{33}x_3 + a_{23}a_{34}x_4, \\ \dot{x}_8 = a_{43}a_{31}x_1 + a_{43}a_{32}x_2 - a_{43}a_{33}x_3 - a_{43}a_{34}x_4. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_6 = -(a_{21}a_{11} + a_{23}a_{31})x_1 - (a_{21}a_{12} + a_{23}a_{32})x_2 + a_{23}a_{33}x_3 + a_{23}a_{34}x_4 + a_{21}b_k u, \\ \dot{x}_8 = a_{43}a_{31}x_1 + a_{43}a_{32}x_2 - a_{43}a_{33}x_3 - a_{43}a_{34}x_4. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_6' = -a_{61}x_1 - a_{62}x_2 + a_{63}x_3 + a_{64}x_4 + b_{k1}u, \\ \dot{x}_8' = a_{81}x_1 + a_{82}x_2 - a_{83}x_3 - a_{84}x_4. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{61} = a_{21}a_{11} + a_{23}a_{31}, \quad a_{62} = a_{21}a_{12} + a_{23}a_{32}, \quad a_{63} = a_{23}a_{33}, \quad a_{64} = a_{23}a_{34}, \quad b_{k1} = a_{21}b_k,$$

$$a_{81} = a_{43}a_{31}, \quad a_{82} = a_{43}a_{32}, \quad a_{83} = a_{43}a_{33}, \quad a_{84} = a_{43}a_{34}.$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных и по скорости двигателя и по скорости второй массы примет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1' = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u, \\ \dot{x}_2' = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3' = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4' = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_6' = -a_{61}x_1 - a_{62}x_2 + a_{63}x_3 + a_{64}x_4 + b_{k1}u, \\ \dot{x}_8' = a_{81}x_1 + a_{82}x_2 - a_{83}x_3 - a_{84}x_4. \end{cases} \quad (2.11)$$

Вводим пятую x_5 и восьмую x_8 координаты

Вводим одновременно и пятую ($x_1' = x_5$) и восьмую ($x_4' = x_8$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} \dot{x}_5' = -a_{11}x_1' - a_{12}x_2' + b_k u_1', \\ \dot{x}_8' = a_{43}x_3' \end{cases}, \quad \begin{cases} \dot{x}_5' = -a_{11}x_5 - a_{12}a_{21}x_1 + a_{12}a_{23}x_3 + b_k u_2, \\ \dot{x}_8' = a_{43}a_{31}x_1 + a_{43}a_{32}x_2 - a_{43}a_{33}x_3 - a_{43}a_{34}x_4. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{55} = a_{11}, \quad a_{51} = a_{12}a_{21}, \quad a_{53} = a_{12}a_{23}, \quad a_{81} = a_{43}a_{31}, \quad a_{82} = a_{43}a_{32}, \quad a_{83} = a_{43}a_{33}, \quad a_{84} = a_{43}a_{34},$$

$$u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t).$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных и по току якорной цепи и по скорости второй массы примет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u_1, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_5 = -a_{51}x_1 + a_{53}x_3 - a_{55}x_5 + b_k u_2, \\ \dot{x}_8 = a_{81}x_1 + a_{82}x_2 - a_{83}x_3 - a_{84}x_4. \end{cases} \quad (2.12)$$

Вводим шестую x_6 и седьмую x_7 координаты

Вводим одновременно и шестую ($x'_2 = x_6$) и седьмую ($x'_3 = x_7$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} \dot{x}'_6 = a_{21}\dot{x}'_1 - a_{23}\dot{x}'_3, \\ \dot{x}'_7 = a_{31}\dot{x}'_1 + a_{32}\dot{x}'_2 - a_{33}\dot{x}'_3 - a_{34}\dot{x}'_4, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}'_6 = -a_{21}a_{11}x_1 - a_{21}a_{12}x_2 + a_{21}b_k u - a_{23}x_7, \\ \dot{x}'_7 = -a_{31}a_{11}x_1 - a_{31}a_{12}x_2 + a_{31}b_k u + a_{32}x_6 - a_{33}x_7 - a_{34}a_{43}x_3. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}'_6 = -a_{61}x_1 - a_{62}x_2 - a_{67}x_7 + b_{k1}u, \\ \dot{x}'_7 = -a_{71}x_1 - a_{72}x_2 - a_{73}x_3 + a_{76}x_6 - a_{77}x_7 + b_{k2}u. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{61} = a_{21}a_{11}, \quad a_{62} = a_{21}a_{12}, \quad a_{67} = a_{23}, \quad b_{k1} = a_{21}b_k,$$

$$b_{k2} = a_{31}b_k, \quad a_{71} = a_{31}a_{11}, \quad a_{72} = a_{31}a_{12}, \quad a_{76} = a_{32}, \quad a_{77} = a_{33}, \quad a_{73} = a_{34}a_{43}.$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных и по скорости двигателя и по упругому моменту примет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_6 = -a_{61}x_1 - a_{62}x_2 - a_{67}x_7 + b_{k1}u, \\ \dot{x}_7 = -a_{71}x_1 - a_{72}x_2 - a_{73}x_3 + a_{76}x_6 - a_{77}x_7 + b_{k2}u. \end{cases} \quad (2.13)$$

Вводим пятую, шестую и седьмую координаты

Вводим одновременно пятую ($x'_1 = x_5$), шестую ($x'_2 = x_6$) и седьмую ($x'_3 = x_7$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} \dot{x}'_5 = -a_{11}x'_1 - a_{12}x'_2 + b_k u', \\ \dot{x}'_6 = a_{21}x'_1 - a_{23}x'_3, \\ \dot{x}'_7 = a_{31}x'_1 + a_{32}x'_2 - a_{33}x'_3 - a_{34}x'_4. \end{cases}, \quad \begin{cases} \dot{x}_5 = -a_{11}x_5 - a_{12}x_6 + b_k u_2, \\ \dot{x}_6 = a_{21}x_5 - a_{23}x_7, \\ \dot{x}_7 = a_{31}x_5 + a_{32}x_6 - a_{33}x_7 - a_{34}a_{43}x_3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}'_5 = -a_{55}x_5 - a_{56}x_6 + b_k u_2, \\ \dot{x}'_6 = a_{65}x_5 - a_{67}x_7, \\ \dot{x}'_7 = -a_{73}x_3 + a_{75}x_5 + a_{76}x_6 - a_{77}x_7. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{55} = a_{11}, \quad a_{56} = a_{12}, \quad a_{65} = a_{21}, \quad a_{67} = a_{23}, \quad a_{75} = a_{31}, \quad a_{76} = a_{32}, \quad a_{77} = a_{33}, \quad a_{73} = a_{34}a_{43},$$

$$u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t).$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных по току якорной цепи, скорости двигателя и упругому моменту примет вид:

$$\begin{cases} x_1' = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u_1, \\ x_2' = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ x_3' = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ x_4' = a_{43}x_3, \\ x_5' = -a_{55}x_5 - a_{56}x_6 + b_k u_2, \\ x_6' = a_{65}x_5 - a_{67}x_7, \\ x_7' = -a_{73}x_3 + a_{75}x_5 + a_{76}x_6 - a_{77}x_7. \end{cases} \quad (2.14)$$

Вводим пятую, шестую и восьмую координаты

Вводим одновременно пятую ($x_1' = x_5$), шестую ($x_2' = x_6$) и восьмую ($x_4' = x_8$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} x_5' = -a_{11}x_1' - a_{12}x_2' + b_k u_1', \\ x_6' = a_{21}x_1' - a_{23}x_3', \\ x_8' = a_{43}x_3'. \end{cases}, \quad \begin{cases} x_5' = -a_{11}x_5 - a_{12}x_6 + b_k u_2, \\ x_6' = a_{21}x_5 - a_{23}a_{31}x_1 - a_{23}a_{32}x_2 + a_{23}a_{33}x_3 + a_{23}a_{34}x_4, \\ x_8' = a_{43}a_{31}x_1 + a_{43}a_{32}x_2 - a_{43}a_{33}x_3 - a_{43}a_{34}x_4. \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_5' = -a_{55}x_5 - a_{56}x_6 + b_k u_2, \\ x_6' = -a_{61}x_1 - a_{62}x_2 + a_{63}x_3 + a_{64}x_4 + a_{65}x_5, \\ x_8' = a_{81}x_1 + a_{82}x_2 - a_{83}x_3 - a_{84}x_4. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{55} = a_{11}, \quad a_{56} = a_{12}, \quad a_{61} = a_{23}a_{31}, \quad a_{62} = a_{23}a_{32}, \quad a_{63} = a_{23}a_{33}, \quad a_{64} = a_{23}a_{34}, \quad a_{65} = a_{21},$$

$$a_{81} = a_{43}a_{31}, \quad a_{82} = a_{43}a_{32}, \quad a_{83} = a_{43}a_{33}, \quad a_{84} = a_{43}a_{34}, \quad u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t).$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных по току якорной цепи, скорости двигателя и скорости второй массы примет вид:

$$\begin{cases} x_1' = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u_1, \\ x_2' = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ x_3' = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ x_4' = a_{43}x_3, \\ x_5' = -a_{55}x_5 - a_{56}x_6 + b_k u_2, \\ x_6' = -a_{61}x_1 - a_{62}x_2 + a_{63}x_3 + a_{64}x_4 + a_{65}x_5, \\ x_8' = a_{81}x_1 + a_{82}x_2 - a_{83}x_3 - a_{84}x_4. \end{cases} \quad (2.15)$$

Вводим пятую, седьмую и восьмую координаты

Вводим одновременно пятую ($x_1' = x_5$), седьмую ($x_3' = x_7$) и восьмую ($x_4' = x_8$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} x_5' = -a_{11}x_1' - a_{12}x_2' + b_k u_1', \\ x_7' = a_{31}x_1' + a_{32}x_2' - a_{33}x_3' - a_{34}x_4', \\ x_8' = a_{43}x_3'. \end{cases} \quad \begin{cases} x_5' = -a_{11}x_5 - a_{12}a_{21}x_1 + a_{12}a_{23}x_3 + b_k u_2, \\ x_7' = a_{31}x_5 + a_{32}a_{21}x_1 - a_{32}a_{23}x_3 - a_{33}x_7 - a_{34}x_8, \\ x_8' = a_{43}x_7. \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_5' = -a_{51}x_1 + a_{53}x_3 - a_{55}x_5 + b_k u_2, \\ x_7' = a_{71}x_1 - a_{73}x_3 + a_{75}x_5 - a_{77}x_7 - a_{78}x_8, \\ x_8' = a_{87}x_7. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} a_{55} &= a_{11}, \quad a_{51} = a_{12}a_{21}, \quad a_{53} = a_{12}a_{23}, \quad a_{71} = a_{32}a_{21}, \quad a_{73} = a_{32}a_{23}, \\ a_{75} &= a_{31}, \quad a_{77} = a_{33}, \quad a_{78} = a_{34}, \quad a_{87} = a_{43}, \quad u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t). \end{aligned}$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных по току якорной цепи, упругому моменту и скорости второй массы примет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u_1, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_5 = -a_{51}x_1 + a_{53}x_3 - a_{55}x_5 + b_k u_2, \\ \dot{x}_7 = a_{71}x_1 - a_{73}x_3 + a_{75}x_5 - a_{77}x_7 - a_{78}x_8 \\ \dot{x}_8 = a_{87}x_7. \end{cases} \quad (2.16)$$

Вводим шестую, седьмую и восьмую координаты

Вводим одновременно шестую ($x'_2 = x_6$), седьмую ($x'_3 = x_7$) и восьмую ($x'_4 = x_8$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} \dot{x}_6 = a_{21}\dot{x}_1 - a_{23}\dot{x}_3, \\ \dot{x}_7 = a_{31}\dot{x}_1 + a_{32}\dot{x}_2 - a_{33}\dot{x}_3 - a_{34}\dot{x}_4, \\ \dot{x}_8 = a_{43}\dot{x}_3. \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{x}_6 = -a_{21}a_{11}x_1 - a_{21}a_{12}x_2 + a_{21}b_k u - a_{23}x_7, \\ \dot{x}_7 = -a_{31}a_{11}x_1 - a_{31}a_{12}x_2 + a_{31}b_k u + a_{32}x_6 - a_{33}x_7 - a_{34}x_8, \\ \dot{x}_8 = a_{43}x_7. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_6 = -a_{61}x_1 - a_{62}x_2 - a_{67}x_7 + b_{k1}u, \\ \dot{x}_7 = -a_{71}x_1 - a_{72}x_2 + a_{76}x_6 - a_{77}x_7 - a_{78}x_8 + b_{k2}u \\ \dot{x}_8 = a_{87}x_7. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} a_{61} &= a_{21}a_{11}, \quad a_{62} = a_{21}a_{12}, \quad a_{67} = a_{23}, \quad b_{16} = a_{21}b_k, \quad a_{71} = a_{31}a_{11}, \\ a_{72} &= a_{31}a_{12}, \quad b_{17} = a_{31}b_k, \quad a_{76} = a_{32}, \quad a_{77} = a_{33}, \quad a_{78} = a_{34}, \quad a_{87} = a_{43}. \end{aligned}$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных по скорости двигателя, по упругому моменту и по скорости второй массы примет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_6 = -a_{61}x_1 - a_{62}x_2 - a_{67}x_7 + b_{k1}u, \\ \dot{x}_7 = -a_{71}x_1 - a_{72}x_2 + a_{76}x_6 - a_{77}x_7 - a_{78}x_8 + b_{k2}u \\ \dot{x}_8 = a_{87}x_7 \end{cases} \quad (2.17)$$

Вводим пятую, шестую, седьмую и восьмую координаты

Вводим одновременно пятую ($x'_1 = x_5$), шестую ($x'_2 = x_6$), седьмую ($x'_3 = x_7$) и восьмую ($x'_4 = x_8$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} \dot{x}'_5 = -a_{11}x'_1 - a_{12}x'_2 + b_k u'_1, \\ \dot{x}'_6 = a_{21}x'_1 - a_{23}x'_3, \\ \dot{x}'_7 = a_{31}x'_1 + a_{32}x'_2 - a_{33}x'_3 - a_{34}x'_4, \\ \dot{x}'_8 = a_{43}x'_3 \end{cases}, \quad \begin{cases} \dot{x}'_5 = -a_{11}x_5 - a_{12}x_6 + b_k u_2, \\ \dot{x}'_6 = a_{21}x_5 - a_{23}x_7, \\ \dot{x}'_7 = a_{31}x_5 + a_{32}x_6 - a_{33}x_7 - a_{34}x_8, \\ \dot{x}'_8 = a_{43}x_7. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_5 = -a_{55}x_5 - a_{56}x_6 + b_k u_2, \\ \dot{x}_6 = a_{65}x_5 - a_{67}x_7, \\ \dot{x}_7 = a_{75}x_5 + a_{76}x_6 - a_{77}x_7 - a_{78}x_8, \\ \dot{x}_8 = a_{87}x_7. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} a_{55} = a_{11}, \quad a_{56} = a_{12}, \quad a_{65} = a_{21}, \quad a_{67} = a_{23}, \quad a_{75} = a_{31}, \quad a_{76} = a_{32}, \\ a_{77} = a_{33}, \quad a_{78} = a_{34}, \quad a_{87} = a_{43}, \quad u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t). \end{aligned}$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных по току якорной цепи, скорости двигателя, упругому моменту и скорости второй массы:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u_1, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = -a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_5 = -a_{55}x_5 - a_{56}x_6 + b_k u_2, \\ \dot{x}_6 = a_{65}x_5 - a_{67}x_7, \\ \dot{x}_7 = a_{75}x_5 + a_{76}x_6 - a_{77}x_7 - a_{78}x_8, \\ \dot{x}_8 = a_{87}x_7. \end{cases} \quad (2.18)$$

Математическое описание двухмассовой электромеханической системы с коррекцией тока якорной цепи в формализованном виде следующее:

$$\begin{cases} \dot{x}_2' = a_{23}x_3 + b_{21}u, \\ \dot{x}_3' = a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4 + b_{31}u, \\ \dot{x}_4' = a_{43}x_3. \end{cases} \quad (2.19)$$

Рассмотрим математическое описание двухмассовой электромеханической системы с коррекцией тока якорной цепи при введении дополнительных координат: x_6 , x_7 и x_8 - производных соответственно скорости двигателя, упругого момента и скорости второй массы: $x'_2 = x_6$, $x'_3 = x_7$, $x'_4 = x_8$.

Вводим шестую координату x_6

Вводим шестую координату $x_6 = x'_2$ и берем ее производную

$$\begin{aligned}x'_6 &= -a_{23}x'_3 + b_{21}u', \\x'_6 &= -a_{23}a_{32}x_2 + a_{23}a_{33}x_3 + a_{23}a_{34}x_4 - a_{23}b_{31}u + b_{21}u', \\x'_6 &= -a_{62}x_2 + a_{63}x_3 + a_{64}x_4 - b_{61}u_1 + b_{62}u_2\end{aligned}$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}a_{62} &= a_{23}a_{32}, \quad a_{63} = a_{23}a_{33}, \quad a_{64} = a_{23}a_{34}, \quad b_{61} = a_{23}b_{31}, \quad b_{62} = b_{21}, \\u &= u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t).\end{aligned}$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производной по скорости двигателя:

$$\begin{cases}x'_2 = -a_{23}x_3 + b_{21}u_1, \\x'_3 = a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4 + b_{31}u_1, \\x'_4 = a_{43}x_3, \\x'_6 = -a_{62}x_2 + a_{63}x_3 + a_{64}x_4 - b_{61}u_1 + b_{62}u_2.\end{cases} \quad (2.20)$$

Вводим седьмую координату x_7

Вводим седьмую координату $x_7 = x'_3$ и берем ее производную

$$\begin{aligned}
\dot{x}_7 &= a_{32}\dot{x}_2 - a_{33}\dot{x}_3 - a_{34}\dot{x}_4 + b_{31}\dot{u}, \\
\dot{x}_7 &= -a_{32}a_{23}x_3 + a_{32}b_{21}u_1 - a_{33}x_7 - a_{34}a_{43}x_3 + b_{31}\dot{u}, \\
\dot{x}_7 &= -(a_{32}a_{23} + a_{34}a_{43})x_3 - a_{33}x_7 + a_{32}b_{21}u_1 + b_{31}\dot{u}, \\
\dot{x}_7 &= -a_{73}x_3 - a_{77}x_7 + b_{71}u_1 + b_{72}u_2,
\end{aligned}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{73} = a_{32}a_{23} + a_{34}a_{43}, \quad a_{77} = a_{33}, \quad b_{71} = a_{32}b_{21}, \quad b_{72} = b_{31}, \quad u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t).$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производной по упругому моменту:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -a_{23}x_3 + b_{21}u_1, \\ \dot{x}_3 = a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4 + b_{31}u_1, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_7 = -a_{73}x_3 - a_{77}x_7 + b_{71}u_1 + b_{72}u_2. \end{cases} \quad (2.21)$$

Вводим восьмую координату x_8

Вводим седьмую координату $x_8 = x'_4$ и берем ее производную

$$\begin{aligned}
\dot{x}_8 &= a_{43}\dot{x}_3, \\
\dot{x}_8 &= a_{43}a_{32}x_2 - a_{43}a_{33}x_3 - a_{43}a_{34}x_4 + a_{43}b_{31}\dot{u}, \\
\dot{x}_8 &= a_{82}x_2 - a_{83}x_3 - a_{84}x_4 + b_{81}\dot{u}.
\end{aligned}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{82} = a_{43}a_{32}, \quad a_{83} = a_{43}a_{33}, \quad a_{84} = a_{43}a_{34}, \quad b_{81} = a_{43}b_{31}.$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производной по скорости второй массы:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -a_{23}x_3 + b_{21}u, \\ \dot{x}_3 = a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4 + b_{31}u, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_8 = a_{82}x_2 - a_{83}x_3 - a_{84}x_4 + b_{81}u. \end{cases} \quad (2.22)$$

Вводим шестую x_6 и седьмую x_7 координаты

Вводим одновременно и шестую ($\dot{x}_2' = \dot{x}_6$) и седьмую ($\dot{x}_3' = \dot{x}_7$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} \dot{x}_6' = -a_{23}\dot{x}_3' + b_{21}u', \\ \dot{x}_7' = a_{32}\dot{x}_2' - a_{33}\dot{x}_3' - a_{34}\dot{x}_4' + b_{31}u'. \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{x}_6 = -a_{23}x_7 + b_{21}u', \\ \dot{x}_7 = a_{32}x_6 - a_{33}x_7 - a_{34}a_{43}x_3 + b_{31}u'. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_6' = -a_{67}x_7 + b_{61}u_2, \\ \dot{x}_7' = a_{76}x_6 - a_{77}x_7 - a_{73}x_3 + b_{71}u_2. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{67} = a_{23}, \quad b_{61} = b_{21}, \quad a_{73} = a_{34}a_{43}, \quad a_{76} = a_{32}, \quad a_{77} = a_{33}, \quad b_{71} = b_{31}, \quad u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t).$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных и по скорости двигателя и по упругому моменту примет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -a_{23}x_3 + b_{21}u_1, \\ \dot{x}_3 = a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4 + b_{31}u_1, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_6 = -a_{67}x_7 + b_{61}u_2, \\ \dot{x}_7 = a_{76}x_6 - a_{77}x_7 - a_{73}x_3 + b_{71}u_2. \end{cases} \quad (2.23)$$

Вводим шестую x_6 и восьмую x_8 координаты

Вводим одновременно и шестую ($x'_2 = x_6$) и восьмую ($x'_4 = x_8$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} \dot{x}'_6 = -a_{23}\dot{x}_3 + b_{21}u'_1, \\ \dot{x}'_8 = a_{43}\dot{x}_3. \end{cases}, \quad \begin{cases} \dot{x}'_6 = -a_{23}a_{32}x_2 + a_{23}a_{33}x_3 + a_{23}a_{34}x_4 - a_{23}b_{31}u_1 + b_{21}u'_1, \\ \dot{x}'_8 = a_{43}a_{32}x_2 - a_{43}a_{33}x_3 - a_{43}a_{34}x_4 + a_{43}b_{31}u_1. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}'_6 = -a_{62}x_2 + a_{63}x_3 + a_{64}x_4 - b_{61}u_1 + b_{62}u_2, \\ \dot{x}'_8 = a_{82}x_2 - a_{83}x_3 - a_{84}x_4 + b_{81}u_1. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} a_{62} &= a_{23}a_{32}, \quad a_{63} = a_{23}a_{33}, \quad a_{64} = a_{23}a_{34}, \quad b_{61} = a_{23}b_{31}, \quad b_{62} = b_{21}, \\ a_{82} &= a_{43}a_{32}, \quad a_{83} = a_{43}a_{33}, \quad b_{81} = a_{43}b_{31}, \quad u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t). \end{aligned}$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных и по скорости двигателя и по скорости второй массы примет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -a_{23}x_3 + b_{21}u_1, \\ \dot{x}_3 = a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4 + b_{31}u_1, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_6 = -a_{62}x_2 + a_{63}x_3 + a_{64}x_4 - b_{61}u_1 + b_{62}u_2, \\ \dot{x}_8 = a_{82}x_2 - a_{83}x_3 - a_{84}x_4 + b_{81}u_1. \end{cases} \quad (2.24)$$

Вводим седьмую x_7 и восьмую x_8 координаты

Вводим одновременно и седьмую ($x'_3 = x_7$) и восьмую ($x'_4 = x_8$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} \dot{x}_7 = a_{32}\dot{x}_2 - a_{33}\dot{x}_3 - a_{34}\dot{x}_4 + b_{31}\dot{u}_1, \\ \dot{x}_8 = a_{43}\dot{x}_3. \end{cases}, \quad \begin{cases} \dot{x}_7 = -a_{32}a_{23}x_3 + a_{32}b_{21}u - a_{33}x_7 - a_{34}x_8 + b_{31}\dot{u}, \\ \dot{x}_8 = a_{43}x_7. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_7 = -a_{73}x_3 - a_{77}x_7 - a_{78}x_8 + b_{71}u_1 + b_{72}u_2, \\ \dot{x}_8 = a_{87}x_7. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{73} = a_{32}a_{23}, \quad a_{77} = a_{33}, \quad a_{78} = a_{34}, \quad b_{71} = a_{32}b_{21}, \quad b_{72} = b_{31}, \quad a_{87} = a_{43},$$

$$u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t).$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных и по упругому моменту и по скорости второй массы примет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -a_{23}x_3 + b_{21}u, \\ \dot{x}_3 = a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4 + b_{31}u, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_7 = -a_{73}x_3 - a_{77}x_7 - a_{78}x_8 + b_{71}u_1 + b_{72}u_2, \\ \dot{x}_8 = a_{87}x_7. \end{cases} \quad (2.25)$$

Вводим шестую, седьмую и восьмую координаты

Вводим одновременно шестую ($x'_2 = x_6$), седьмую ($x'_3 = x_7$) и восьмую ($x'_4 = x_8$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} \dot{x}'_6 = -a_{23}x'_3 + b_{21}u', \\ \dot{x}'_7 = a_{32}x'_2 - a_{33}x'_3 - a_{34}x'_4 + b_{31}u', \\ \dot{x}'_8 = a_{43}x'_3. \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{x}'_6 = -a_{23}x_7 + b_{21}u', \\ \dot{x}'_7 = a_{32}x_6 - a_{33}x_7 - a_{34}x_8 + b_{31}u', \\ \dot{x}'_8 = a_{43}x_7. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}'_6 = -a_{67}x_7 + b_{61}u_2, \\ \dot{x}'_7 = a_{76}x_6 - a_{77}x_7 - a_{78}x_8 + b_{71}u_2, \\ \dot{x}'_8 = a_{87}x_7. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{67} = a_{23}, \quad a_{76} = a_{32}, \quad a_{77} = a_{33}, \quad a_{78} = a_{34}, \quad b_{61} = b_{21}, \quad b_{71} = b_{31}, \quad a_{87} = a_{43}, \\ u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t).$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных по скорости двигателя, по упругому моменту и по скорости второй массы примет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -a_{23}x_3 + b_{21}u_1, \\ \dot{x}_3 = a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4 + b_{31}u_1, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_6 = -a_{67}x_7 + b_{61}u_2, \\ \dot{x}_7 = a_{76}x_6 - a_{77}x_7 - a_{78}x_8 + b_{71}u_2, \\ \dot{x}_8 = a_{87}x_7. \end{cases} \quad (2.26)$$

В формализованном виде электромеханическая система с коррекцией скорости двигателя описывается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x}'_3 = -a_{33}x_3 - a_{34}x_4 + b_{k2}u, \\ \dot{x}'_4 = a_{43}x_3, \end{cases} \quad (2.27)$$

Рассмотрим математическое описание двухмассовой электромеханической системы с коррекцией скорости двигателя при введении дополнительных координат: x_7 и x_8 - производных соответственно упругого момента и скорости второй массы: $x'_3 = x_7$ $x'_4 = x_8$.

В качестве исходной примем электромеханическую систему с коррекцией скорости двигателя, описанную системой уравнений (2.28).

Вводим седьмую координату x_7

Берем производную седьмой координаты

$$\begin{aligned} \dot{x}'_7 &= -a_{33}\dot{x}'_3 - a_{34}\dot{x}'_4 + b_{k2}\dot{u}, \\ \dot{x}'_7 &= -a_{33}x_7 - a_{34}a_{43}x_3 + b_{k2}u_2, \\ \dot{x}'_7 &= -a_{73}x_3 - a_{77}x_7 + b_{k2}u_2. \end{aligned}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{77} = a_{33}, \quad a_{73} = a_{34}a_{43}, \quad b_{31} = b_{k2}, \quad b_{72} = b_{k2}, \quad u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t).$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производной по упругому моменту:

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = -a_{33}x_3 - a_{34}x_4 + b_{31}u_1, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_7 = -a_{74}x_3 - a_{77}x_7 + b_{72}u_2. \end{cases} \quad (2.29)$$

Вводим восьмую координату x_8

Возьмем производную восьмой координаты

$$\dot{x}_8 = a_{43}\dot{x}_3, \quad \dot{x}_8 = -a_{43}a_{33}x_3 - a_{43}a_{34}x_4 + a_{43}b_{k2}u, \quad \dot{x}_8 = -a_{83}x_3 - a_{84}x_4 + b_{82}u.$$

Введем обозначение:

$$a_{83} = a_{43}a_{33}, \quad a_{84} = a_{43}a_{34}, \quad b_{81} = a_{43}b_{k2}, \quad b_{31} = b_{k2}.$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производной по скорости второй массы:

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = -a_{33}x_3 - a_{34}x_4 + b_{31}u, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_8 = -a_{83}x_3 - a_{84}x_4 + b_{81}u. \end{cases} \quad (2.30)$$

Произведем расчет коэффициентов:

$$a_{83} = a_{43}a_{33} = 29,994 \cdot 39,196 = 1175,645$$

Вводим седьмую x_7 и восьмую x_8 координаты

Вводим одновременно и седьмую ($x'_3 = x_7$) и восьмую ($x'_4 = x_8$) координаты и берем их производные:

$$\begin{cases} x'_7 = -a_{33}x'_3 - a_{34}x'_4 + b_{k2}u', \\ x'_8 = a_{43}x'_3. \end{cases}, \begin{cases} x'_7 = -a_{33}x_7 - a_{34}x_8 + b_{k2}u_2, \\ x'_8 = a_{43}x_7. \end{cases}$$

$$\begin{cases} x'_7 = -a_{77}x_7 - a_{78}x_8 + b_{k2}u_2, \\ x'_8 = a_{87}x_7. \end{cases}$$

Введем следующие обозначения:

$$a_{77} = a_{33}, \quad a_{78} = a_{34}, \quad a_{87} = a_{43}, \quad b_{31} = b_{k2}, \quad b_{72} = b_{k2}, \quad u = u(t) = u_1, \quad u_2 = u'(t).$$

Математическое описание электромеханической системы с учетом производных и по упругому моменту и по скорости второй массы примет вид:

$$\begin{cases} x'_3 = -a_{33}x_3 - a_{34}x_4 + b_{31}u_1, \\ x'_4 = a_{43}x_3, \\ x'_7 = -a_{77}x_7 - a_{78}x_8 + b_{72}u_2, \\ x'_8 = a_{87}x_7. \end{cases}$$

3 Исследование комбинированных оптимальных систем управления без учета допущений при синтезе

Известно, что классические комбинированные системы сочетают регулирование по управлению и возмущению. В отличие от классических, комбинированные оптимальные системы управления проф. Кочеткова сочетают подчиненное регулирование внутренних и оптимальное регулирование внешних координат электропривода.

Замечено, что электропривод с СПР по сравнению с ООС может иметь при управляющем воздействии небольшое преимущество по быстродействию, но уступает последним при возмущающем воздействии. Поэтому целесообразно строить системы комбинированного оптимального управления, учитывающие как положительные свойства систем подчиненного регулирования, так и систем с ООС.

Комбинированную систему оптимального управления можно составить из системы, представляющей одно-, двух- или трехконтурную систему последовательно системы, ограничивающей динамические нагрузки в механической части при помощи ООС [14, 24].

Рассмотрим одномассовый расчетный объект управления. Первое уравнение системы описывает внутреннюю координату – ток возбуждения (или питающее напряжение), которую необходимо скорректировать методом СПР. Структурная схема контура питающего напряжения приведена на рисунке 3.1. Принимаем некомпенсируемую постоянную $T_\mu = T_B$.

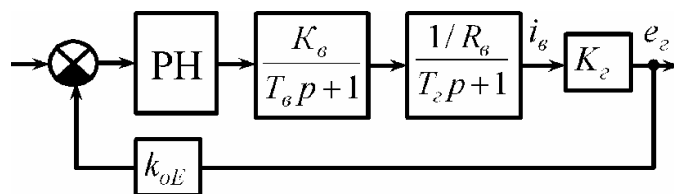


Рисунок 3.1 –. Контур напряжения

По методике расчета на технический оптимум получаем ПИ-регулятор питающего напряжения $(T_{\varepsilon}p + 1) / T_{pn}p$, где $T_{pn} = 2T_{\mu}k_{\varepsilon}k_{oe} / R_{\varepsilon}$.
 Передаточная функция замкнутого контура питающего напряжения

$$W_{\text{зн}}(p) \approx \frac{1 / k_{oe}}{2T_{\mu}p + 1},$$

Согласно теории комбинированных оптимальных систем, для дальнейшего синтеза необходимо пренебречь некомпенсируемой постоянной времени. Тогда $W_{\text{зн}}(p) = K_H$, $K_H = 1 / k_{oe}$.

Остальные два уравнения системы описывают внешние координаты – ток якоря и скорость одномассовой системы, которые необходимо скорректировать методом АКОР. Для этого из математического описания (2.1) исключаем первое уравнение уже скорректированной координаты x_0 , а во второе уравнение системы добавляем слагаемое bU , где $b = K_H U_{\delta} / L_a I_{a\delta}$. Получаем математическую модель уже скорректированной части системы [6, 8, 9]:

$$\begin{cases} x_1' = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u, \\ x_2' = a_{21}^0 x_1, \end{cases}$$

Далее, решаем задачу минимизации критерия оптимальности при помощи программы. В результате получаем структуру электропривода с КОСУ (рисунок 3.2), в которой внутренняя координата x_0 регулируется методом СПР (ПИ-регулятор РН), а остальные (внешние) координаты x_1 и x_2 регулируются методом АКОР (КООС γ_1 и γ_2).

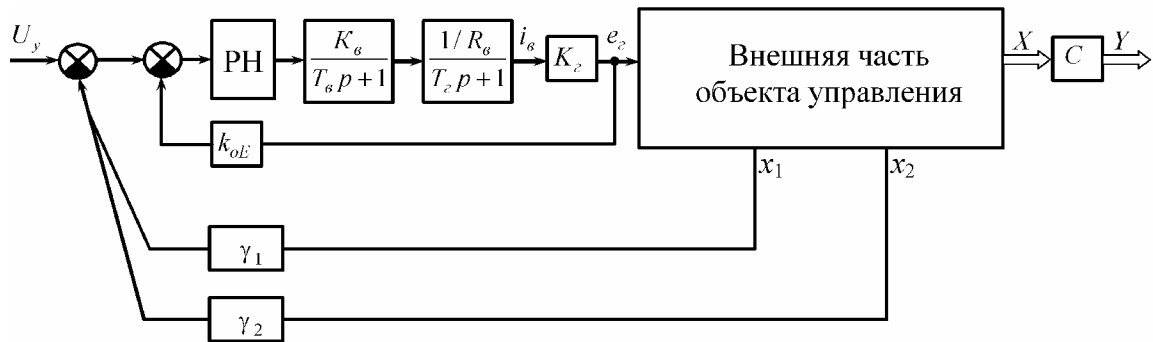


Рисунок 3.2 – Структурная схема электропривода с КОСУ

Если в данной системе в качестве расчетного рассмотреть одномассовый объект управления с избыточностью вектора состояния, то получим дополнительные КООС по комбинациям производных координат x_1 и x_2 . Аналогичным образом получают КОСУ с коррекцией питающего напряжения для двух- и трехмассового расчетного объекта управления.

Теория комбинированных оптимальных систем управления проф. Кочеткова предусматривает также последовательную коррекцию двух внутренних координат (питающее напряжение и ток якоря) и АКОР остальных (внешних) координат и их производных, а также последовательную коррекцию трех внутренних координат (питающее напряжение, ток якоря и скорость первой массы) и АКОР остальных (внешних) координат и их производных [7, 11].

С помощью системы MatLab создаем модель электропривода с КОСУ с коррекцией по питающему напряжению и оптимальными обратными связями (рисунок 3.3). В таблицах 3.1 – 3.3 приведены показатели переходных процессов полученных в результате моделирования в Simulink.

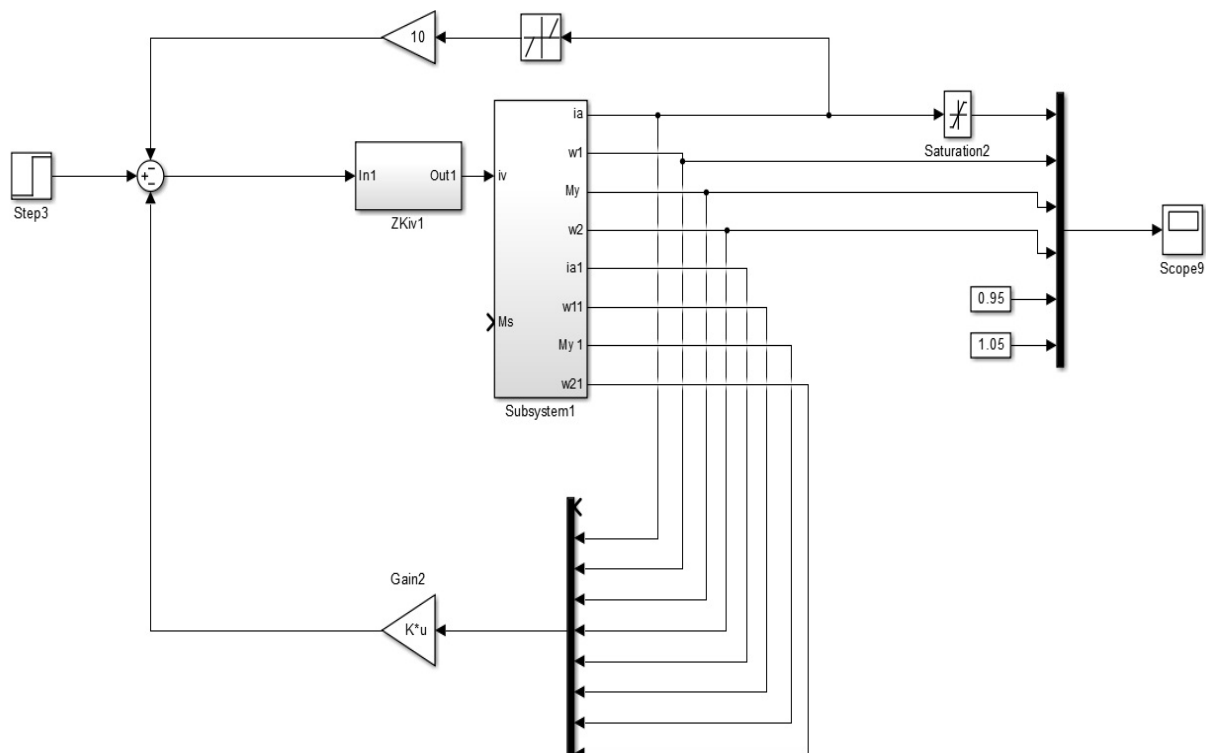


Рисунок 3.3 – Схема модели электропривода с КОСУ с коррекцией по i_v и оптимальными обратными связями

Объект управления имеет вид:

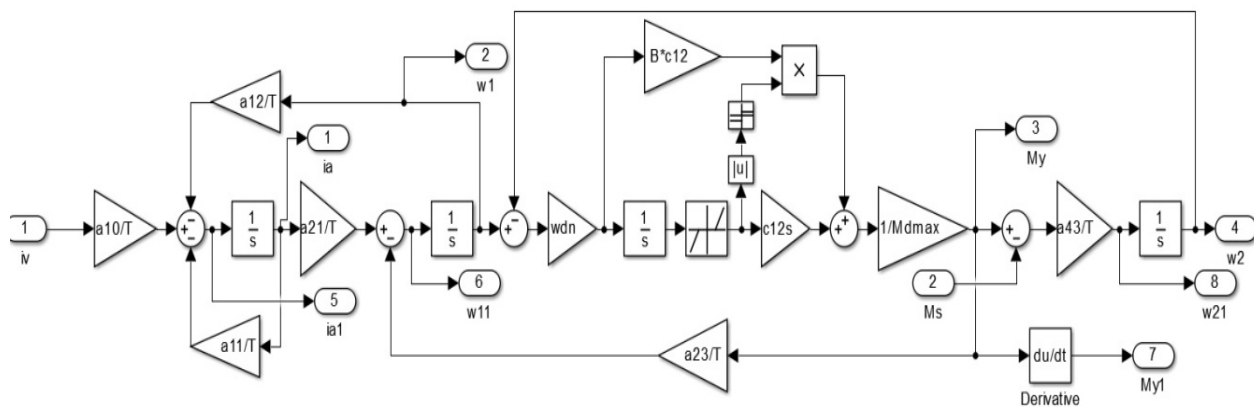


Рисунок 3.4 – Объект управления электропривода с КОСУ с коррекцией по i_v и оптимальными обратными связями

Таблица 3.1 – Показатели переходных процессов двухмассовой комбинированной оптимальной ЭМС с коррекцией по питающему напряжению

№	Вариант	Критерий оптимальности	Показатели переходных процессов	
			М _{мах}	t
1	ia, ω1, My, ω2	общий критерий	1,45	6,70
		критерий управления	1,43	7,02
2	ia, ω1, My, ω2, dia/dt	общий критерий	1,18	8,40
		критерий управления	1,44	7,02
3	ia, ω1, My, ω2, dω1/dt	общий критерий	1,45	6,65
		критерий управления	1,44	6,90
4	ia, ω1, My, ω2, dia/dt, dω1/dt	общий критерий	1,34	6,85
		критерий управления	1,44	6,90
5	ia, ω1, My, ω2, dMy/dt	общий критерий	1,43	6,20
		критерий управления	1,43	7,02
6	ia, ω1, My, ω2, dω2/dt	общий критерий	1,44	6,71
		критерий управления	1,43	7,01
7	ia, ω1, My, ω2, dMy/dt, dω2/dt	общий критерий	1,43	6,21
		критерий управления	1,46	7,01
8	ia, ω1, My, ω2, dia/dt, dMy/dt	общий критерий	1,39	6,32
		критерий управления	1,42	7,02
9	ia, ω1, My, ω2, dia/dt, dω2/dt	общий критерий	1,30	6,90
		критерий управления	1,44	7,00
10	ia, ω1, My, ω2, dia/dt, dMy/dt, dω2/dt	общий критерий	1,39	6,30
		критерий управления	1,45	7,01
11	ia, ω1, My, ω2, dω1/dt, dMy/dt	общий критерий	1,37	6,34
		критерий управления	1,44	6,90
12	ia, ω1, My, ω2, dω1/dt, dω2/dt	общий критерий	1,45	6,65
		критерий управления	1,44	6,90
13	ia, ω1, My, ω2, dω1/dt, dMy/dt, dω2/dt	общий критерий	1,37	6,35
		критерий управления	1,44	6,90
14	ia, ω1, My, ω2, dia/dt, dω1/dt, dMy/dt	общий критерий	1,21	6,96
		критерий управления	1,42	7,01
15	ia, ω1, My, ω2, dia/dt, dω1/dt, dω2/dt	общий критерий	1,32	6,85
		критерий управления	1,44	7,00
16	ia, ω1, My, ω2, dia/dt, dω1/dt, dMy/dt, dω2/dt	общий критерий	1,00	7,55
		критерий управления	1,46	7,03

Наилучшие результаты были получены при введении оптимальных обратных связей по току якоря, скорости двигателя, моменту упругому, скорости второй массы и производной по моменту упругому, току якоря, скорости двигателя, моменту упругому, скорости второй массы и производной по скорости двигателя и моменту упругому (рисунки 3.5 и 3.6).

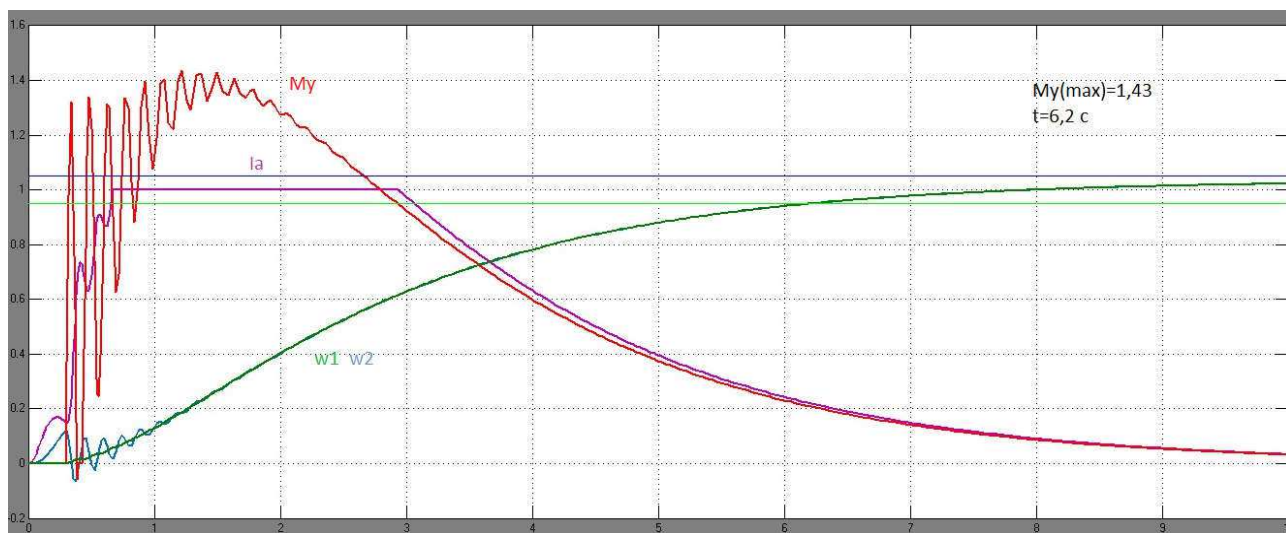


Рисунок 3.5 – Характеристика переходного процесса системы с КОСУ с коррекцией по i_v и оптимальными обратными связями по ω_1 , M_y , ω_2 , dM_y/dt

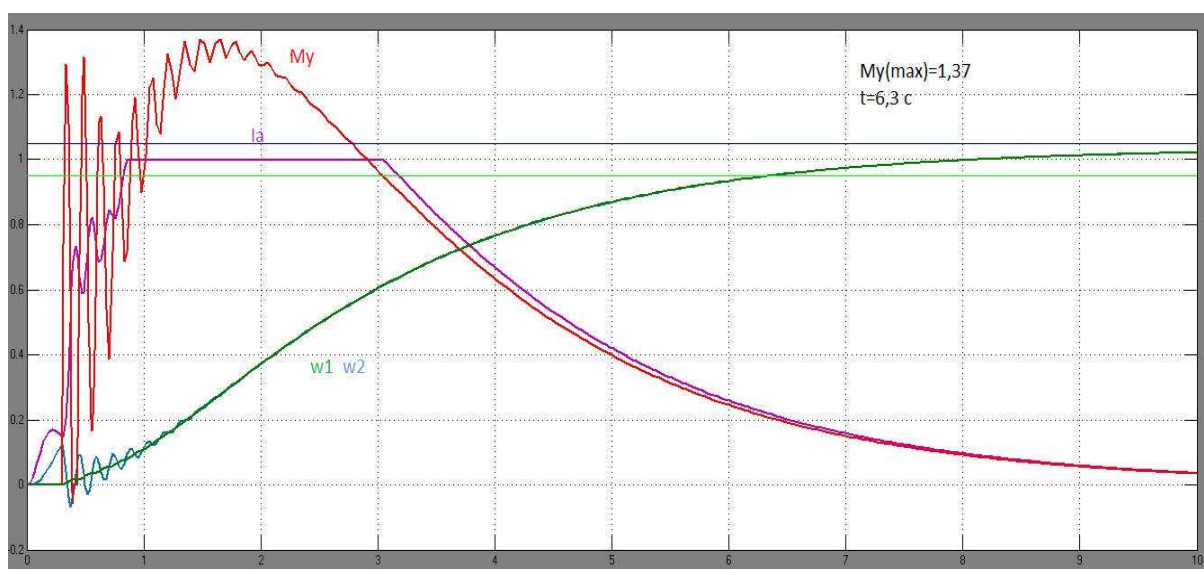


Рисунок 3.6 – Характеристика переходного процесса системы с КОСУ с коррекцией по i_v и оптимальными обратными связями по i_a , ω_1 , M_y , ω_2 , $d\omega_1/dt$, dM_y/dt

Таблица 3.2 – Показатели переходных процессов двухмассовой комбинированной оптимальной ЭМС с коррекцией по току якоря

№	Вариант	Критерий оптимальности	Показатели переходных процессов	
			М _{мах}	t
1	ω_1, M_y, ω_2	общий критерий	1,55	6,75
		критерий управления	1,52	7,12
2	$\omega_1, M_y, \omega_2, d\omega_1/dt$	общий критерий	1,53	6,55
		критерий управления	1,55	6,97
3	$\omega_1, M_y, \omega_2, dM_y/dt$	общий критерий	1,55	6,11
		критерий управления	1,53	7,12
4	$\omega_1, M_y, \omega_2, d\omega_2/dt$	общий критерий	1,55	6,73
		критерий управления	1,52	7,10
5	$\omega_1, M_y, \omega_2, dM_y/dt, d\omega_2/dt$	общий критерий	1,55	6,12
		критерий управления	1,52	7,10
6	$\omega_1, M_y, \omega_2, d\omega_1/dt, dM_y/dt$	общий критерий	1,35	6,4
		критерий управления	1,54	7,11
7	$\omega_1, M_y, \omega_2, d\omega_1/dt, d\omega_2/dt$	общий критерий	1,53	6,55
		критерий управления	-	-
8	$\omega_1, M_y, \omega_2, d\omega_1/dt, dM_y/dt, d\omega_2/dt$	общий критерий	1,38	6,4
		критерий управления	1,55	6,92

Наилучшие результаты были получены при введении оптимальных обратных связей по

- скорости двигателя, моменту упругому, скорости второй массы и производной по моменту упругому (рисунок 3.9)

- скорости двигателя, моменту упругому, скорости второй массы и производной по скорости двигателя и моменту упругому (рисунок 3.10)

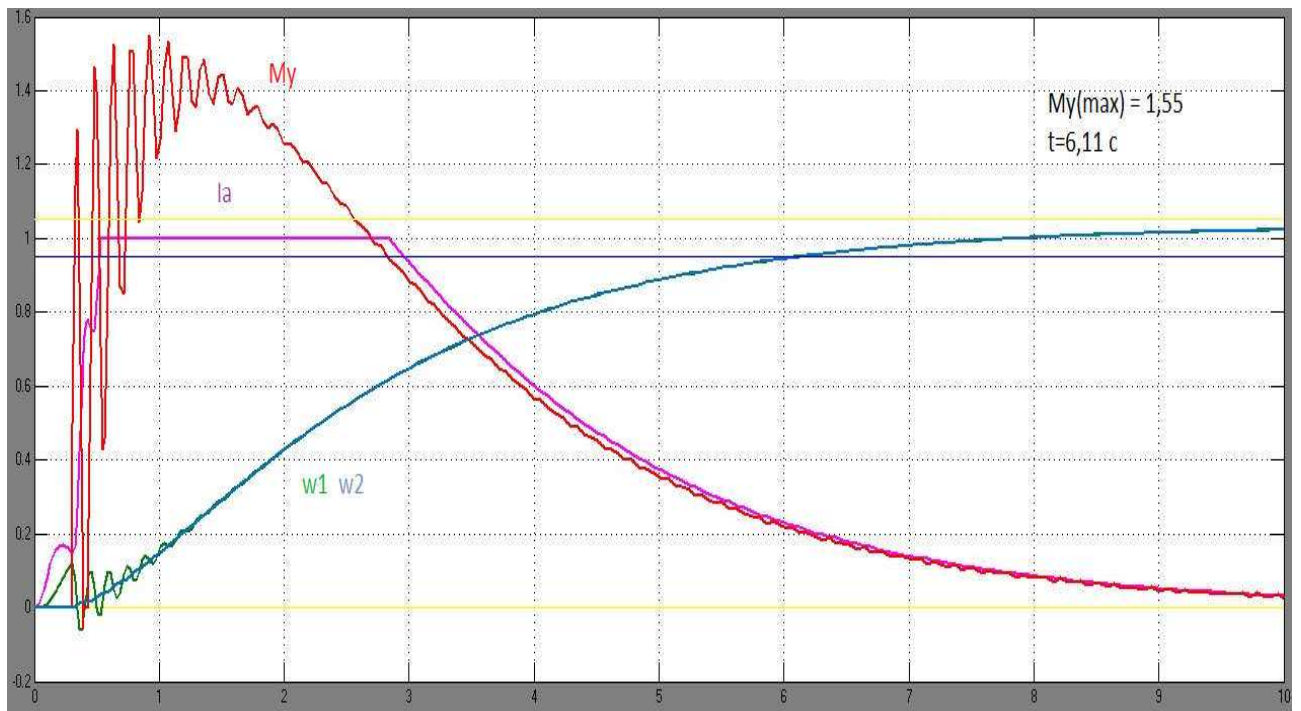


Рисунок 3.9 – Характеристика переходного процесса системы с КОСУ с коррекцией по i_a и оптимальными обратными связями по ω_1 , M_y , ω_2 , dM_y/dt

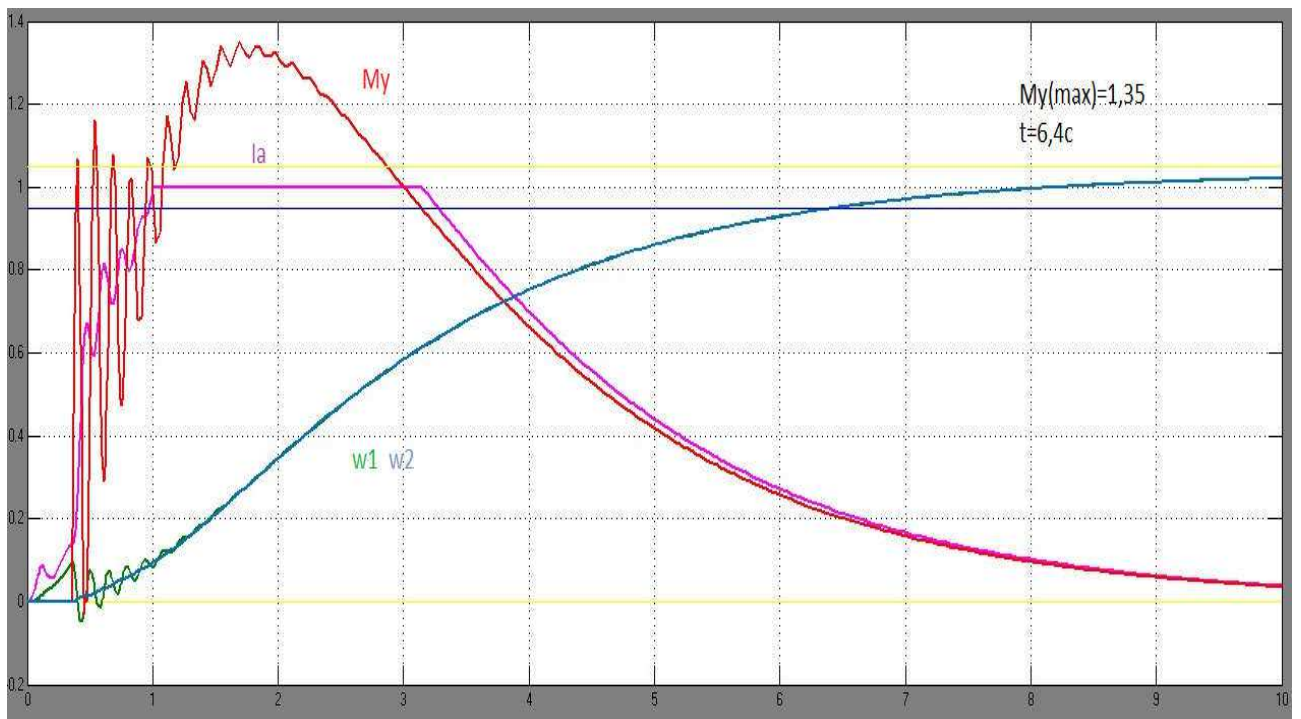


Рисунок 3.10 - Характеристика переходного процесса системы с КОСУ с коррекцией по i_a и оптимальными обратными связями по ω_1 , M_y , ω_2 , $d\omega_1/dt$, dM_y/dt

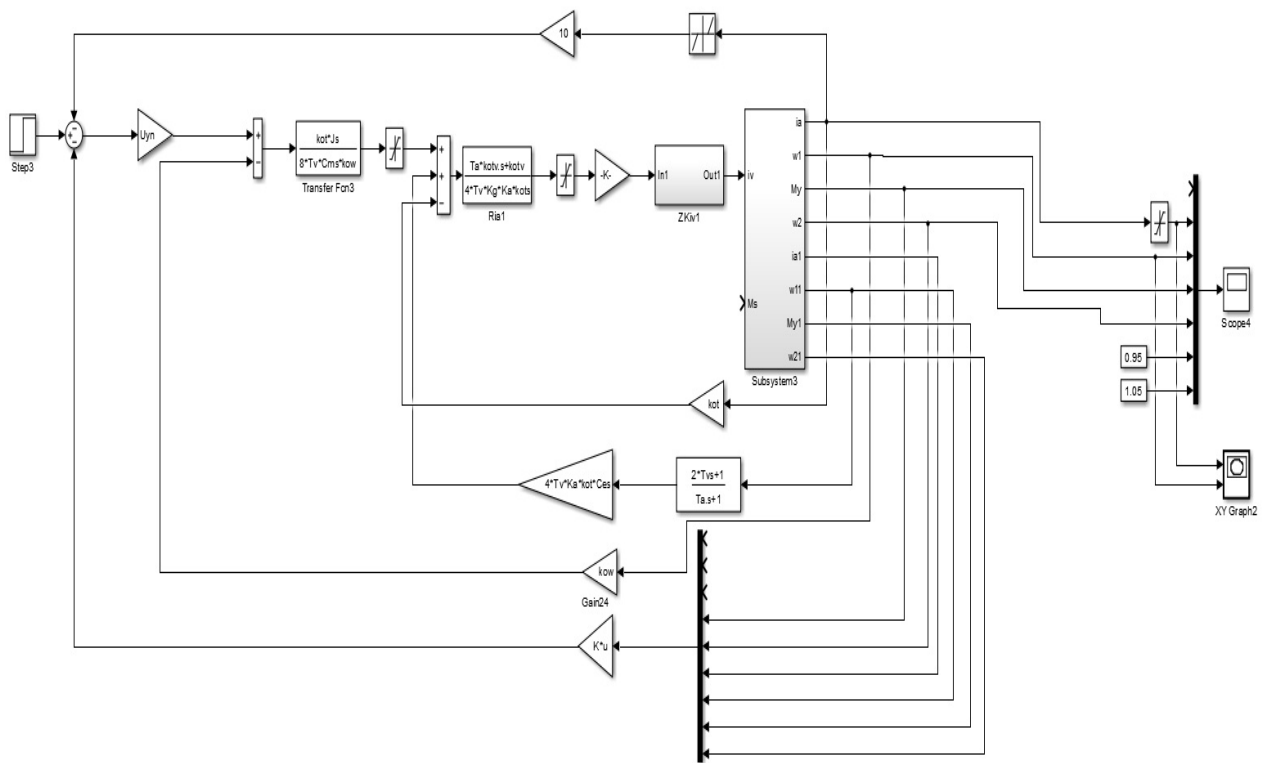


Рисунок 3.12 – Схема модели электропривода с КОСУ с коррекцией по ω_1 и оптимальными обратными связями

Объект управления имеет вид:

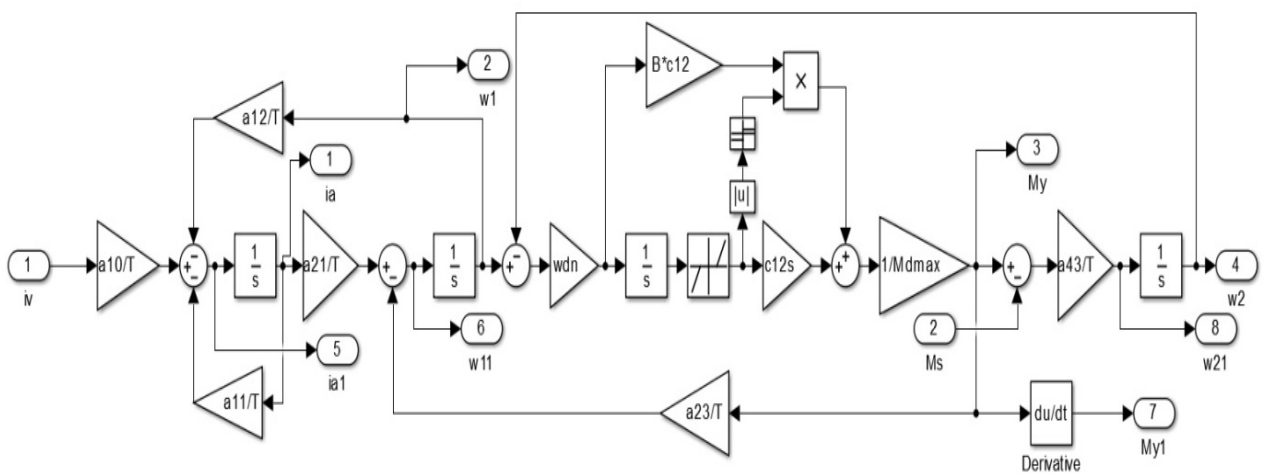


Рисунок 3.14 – Объект управления электропривода с КОСУ с коррекцией по ω_1 и оптимальными обратными связями

Таблица 3.3 – Показатели переходных процессов двухмассовой комбинированной оптимальной ЭМС с коррекцией по питающему напряжению

№	Вариант	Критерий оптимальности	Показатели переходных процессов	
			M_{\max}	t
1	M_y, ω_2	общий критерий	1,55	6,75
		критерий управления	1,55	7,06
2	$M_y, \omega_2, dM_y/dt$	общий критерий	1,55	6,11
		критерий управления	1,55	7,06
3	$M_y, \omega_2, d\omega_2/dt$	общий критерий	1,55	7,06
		критерий управления	-	-
4	$M_y, \omega_2, dM_y/dt, d\omega_2/dt$	общий критерий	1,55	6,11
		критерий управления	-	-

Наилучшие результаты были получены при введении оптимальных обратных связей по

- моменту упругому, скорости второй массы и производной по моменту упругому (рисунок 3.15);

- моменту упругому, скорости второй массы и производной по току моменту упругому и скорости второй массы (рисунок 3.16)

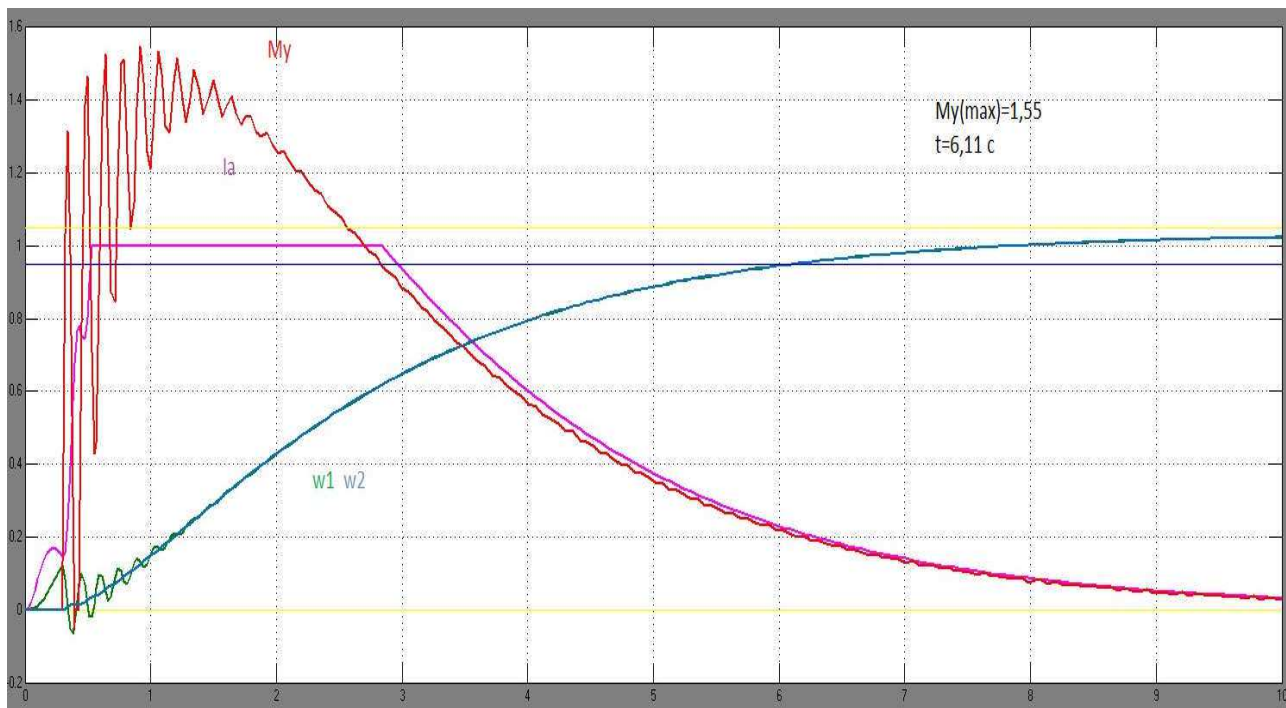


Рисунок 3.15 - Характеристика переходного процесса системы с КОСУ с коррекцией по w_1 и оптимальными обратными связями по M_y , ω_2 , dM_y/dt

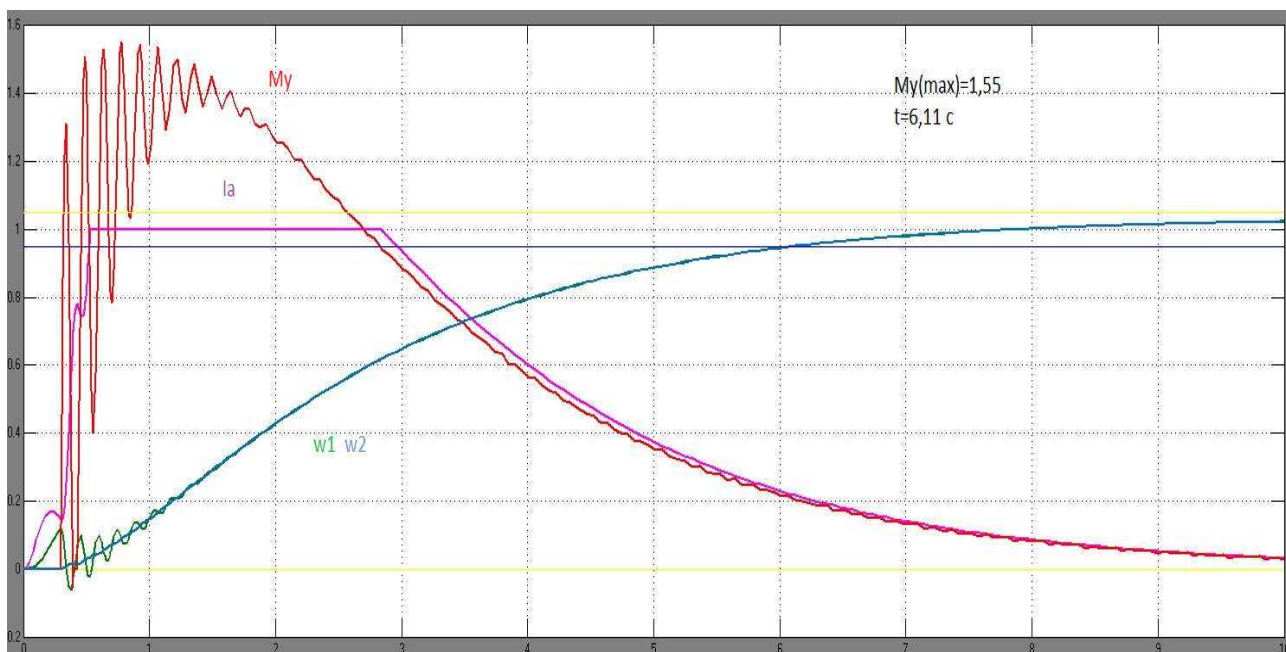


Рисунок 3.16 - Характеристика переходного процесса системы с КОСУ с коррекцией по w_1 и оптимальными обратными связями по dM_y/dt , $d\omega_2/dt$

Комбинированная оптимальная система с коррекцией питающего напряжения позволяет повысить быстродействие и ограничить динамические нагрузки в механической части привода поворота экскаватора.

Целесообразно для одномассового расчетного объекта управления введение одновременно двух производных: по току якоря и скорости первой массы, для двухмассового расчетного объекта управления – по току якоря и упругому моменту или по скорости первой массы и упругому моменту. Комбинированная оптимальная система с последовательной коррекцией координат нуждается в дальнейшей доработке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе были представлены результаты исследования динамики электропривода по системе ТВ–Г–Д с оптимальными обратными связями по координатам объекта управления.

В работе использованы методы математического и графического моделирования.

Использование теории комбинированных оптимальных систем проф. Кочеткова в чистом виде для синтеза системы управления электропривода поворота экскаватора дает желаемые результаты качества переходных процессов для ограниченного числа вариантов из-за наличия ряда излишних упрощений, которые допускаются при составлении математических моделей, для которых в дальнейшем определяются КООС. Оптимальные обратные связи заводимые не только по остальным нескорректированным методами СПР координатам, но и по дополнительной координате уже скорректированного внешнего контура регулирования, разработанные как развитие метода комбинированного оптимального управления, показывают так же не желаемые результаты по качеству переходных процессов.

Разработанная методика учета допущений и упрощений в теории комбинированных оптимальных систем позволяет более адекватно составить математическое описание уже скорректированной и оставшейся (нескорректированной) части системы. Это позволяет более удачно применить к данному математическому описанию процедуру АКОР и найти соответствующие КООС, но при общем усложнении методики и системы управления система не даёт желаемых результатов и результатов отличных от оптимальных систем проф. Кочеткова.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев, В.В. Электрические машины. Моделирование электрических машин электроприводов горного оборудования [текст]: учеб. пособие / В.В. Алексеев, А.Е. Козярук, Э.А. Загрянный. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2006. – 58 с.
2. Валиев, Р.М. Разработка структур систем управления электроприводами главных механизмов одноковшовых экскаваторов-мехлопат [текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Валиев Рустам Мансурович. – М., 2007. – 150 с. – Библиогр.: 131–140 с.
3. Герман-Галкин, С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК [текст]. - СПб. КОРОНА - Век, 2008. - 368 с.
4. Исследование прогнозирующего управления электротехническими системами ветровых электростанций [текст] / А.А. Колесников, Е.Я. Глушкин, А.В. Букатов, А.В. Коловский // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2008. – №3(13), – С. 24–26.
5. Ключев, В.И. Учебное пособие по курсу «Теория электропривода» 2-е издание перераб. и доп. / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
6. Коловский, А.В. Синтез системы управления с переменной структурой электроприводом с использованием эталонной модели [текст] / А.В. Коловский, Е.В. Аболтынь, С.В. Дьяченко // Современные техника и технологии: сб. трудов XV Междунар. научн.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3-х т. Т. 2. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009 – С. 230–231.
7. Коловский, А.В. Синтез систем управления автоматизированным экскаваторным электроприводом с использованием скользящих режимов [текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Коловский Алексей Владимирович. – Абакан 2012. – 173 с. – Библиогр.: 150–165 с.

8. Кочетков, В.П. Совершенствование экскаваторного электропривода [Текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-17-2011): доклады 17-й Междунар. научн.-практ. конф. – Томск: САН ВШ; В-Спектр, 2011. – С. 84–88.

9. Кочетков, В.П. Применение системы с переменной структурой и явной эталонной модели для управления экскаваторным электроприводом [текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – №2, С. 250 – 253.

10. Кочетков, В.П. Основы электромеханики: учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / В.П. Кочетков [и др.]; под ред. В.П. Кочеткова. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2010. –624 с.

11. Кочетков, В.П. Исследование динамики электропривода поворота экскаватора с комбинированной оптимальной системой управления [текст] / В.П. Кочетков, Н.С. Курочкин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет" г. Уфа. – 2016. –Т.20 №3 (37). – С. 101–106.

12. Кочетков, В.П. К вопросу о математической модели электромеханической системы [текст] / В.П. Кочетков, П.Э. Подборский // Сб. трудов XVII Межд. науч. конф. – Кострома: Изд-во Костромского гос. технол. ун-та, 2004. – С. 173–175.

13. Кочетков, В.П. К вопросу о физико-математическом моделировании динамики экскаваторного электропривода [текст] / В.П. Кочетков, А.А. Колесников, А.В. Коловский // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: тр. 3-ей всероссийской научн.-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 76–81.

14. Кочетков, В.П. Компьютерное моделирование электропривода с учетом жесткости и зазора в механической части [текст] / В.П. Кочетков,

П.Э. Подборский // Сб. трудов 5-й Межд. науч.-тех. конф. Ч. 1. – СПб: «Нестор», 2004. – С. 230–234.

15. Кочетков, В.П. Оптимизация систем автоматического управления экскаваторного электропривода [текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский, Н.С. Дьяченко, И.С. Рублевский // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: тр. VI всероссийской научн.-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – С. 223–227.

16. Кочетков, В.П. Основы электропривода [текст]: учеб. пособие. / В.П. Кочетков. – 2-е изд., испр. – Абакан: Сиб. федер. ун-т; ХТИ – Филиал СФУ, 2007. – 272 с.

17. Кочетков, В.П. Совершенствование экскаваторного электропривода [Текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-17-2011): доклады 17-й Междунар. научн.-практ. конф. – Томск: САН ВШ; В-Спектр, 2011. – С.84–88.

18. Курочкин, Н.С. Переходные процессы электрического привода с квазиоптимальной системой управления [текст] / Н.С. Курочкин // Результаты фундаментальных и прикладных исследований в России и за рубежом. Материалы международной научно-практической конференции – Новокузнецк: НИЦ «Поволжская научная корпорация», 2016. – С. 151–153.

19. Курочкин, Н.С. Синтез комбинированной оптимальной системы управления для асинхронных электроприводов экскаваторов [текст] / Н.С. Курочкин // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды Седьмой Всерос. научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: СибГИУ, 2016. – С. 162–169.

20. Курочкин, Н.С. Динамика автоматизированного электропривода с комбинированной оптимальной системой управления [текст] / Кочетков В. П., Курочкин Н. С // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17. № 2. С. 393–402.

21. Курочкин, Н.С. Динамика экскаваторного электропривода переменного тока с комбинированной оптимальной системой управления

[текст] / Кочетков В. П., Курочкин Н. С // Известия вузов. Горный журнал. – 2017. – № 1. – С. 109-116.

22. Курочкин, Н.С. Моделирование и исследование динамики электропривода поворота экскаватора с комбинированной оптимальной системой управления [текст] / В.П. Кочетков, Н.С. Курочкин, А.В. Коловский, Е.Я. Глушкин // Автоматизация процессов управления – Научно-производственное объединение "Марс". – 2016. – №3 (45). – С. 30–37.

23. Подборский, П.Э. Совершенствование методов синтеза систем управления электроприводами поворотных механизмов карьерных экскаваторов [текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Подборский Павел Эдуардович. – Абакан, 2006. – 205 с.

24. Черных, И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений [текст] / Под общ. ред. к. т. н. В. Г. Потемкина. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. - 496 с.

25. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты [текст] / Р.Т. Шрейнер, - Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Каталожные данные экскаватора приведены в табл. А1.

Таблица А.1 – Технические характеристики экскаватора ЭКГ-8И

Элемент характеристики	Параметры экскаватора ЭКГ-8И
Емкость ковша, м ³	8
Масса ковша, т	15.6
Длина стрелы, м	13.4
Длина рукояти, м	11.5
Масса рукояти, т	10.4
Максимальная высота черпанья, м	13.3
Максимальный радиус черпанья, м	17.5
Максимальный вылет рукояти, м	11.1
Высота оси пяты стрелы, м	5.01
Высота напорного вала, м	8.31
Угол наклона стрелы, град.	47
Диаметр головного блока стрелы, м	1.6
Диаметр барабана подъемной лебедки, м	1.4
Диаметр напорного барабана, м	1.2
Максимальная скорость подъема ковша, м/с	0.94
Максимальная скорость напора, м/с	0.45
Максимальное усилие в канате (копающий механизм), кН	784
Максимальное усилие в канате (напорный механизм), кН	350
Расчетная продолжительность цикла при повороте на 90°, с.	23
Передаточные числа механизмов	
напора	41
подъема	25.41
поворота	268.7

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Каталожные данные двигателя и генератора приведены в табл. Б.1.

Таблица Б.1 – Сведения о параметрах электропривода подъема экскаватора ЭКГ-8И

Наименование	Обозначение	Генератор	Двигатель
Тип	-	ГПЭ 450-1000	ДПЭ-82А
Количество, шт.	-	1	2
Мощность, кВт	-	450	190
Напряжение, В	$U_{a.г.н}, U_{a.д.н}$	560	270
Ток номинальный, А	$I_{a.г.н}, I_{a.д.н}$	895	760
Ток стопорный, А	$-, I_{a.д.н}$	—	1520
Угловая скорость, рад/с	$\omega_{г.н}, \omega_{д.н}$	104,72	77.4926
Сопротивление якоря, Ом	$R_{я.г}, R_{я.д}$	7.5×10^{-3}	3.9×10^{-3}
Сопротивление дополнительных полюсов, Ом	$R_{д.п.г}, R_{д.п.д}$	1.63×10^{-3}	3.25×10^{-3}
Сопротивление компенсационной обмотки, Ом	$R_{к.о.г}, R_{к.о.д}$	5.16×10^{-3}	—
Напряжение возбуждения, В	$U_{в.н}, -$	38.5	85
Ток возбуждения, А	$I_{в.н}, -$	29	19.5
Сопротивление обмотки возбуждения, Ом	$R_{в}, -$	1.3276	4.359
Число полюсов, шт.	$p_{г}, p_{д}$	4	4
Число витков на полюсе, шт.	$N_{г}, -$	300	450
Номинальный поток полюса, Вб	$\mathcal{Q}_{г.н}, -$	5.78×10^{-2}	—
Момент инерции, кг·м ²	$-, J_{д}$	—	17

Бакалаврская работа выполнена мной самостоятельно. Используемые в работе материалы и концепции из опубликованной научной литературы и других источников имеют ссылки на них.

Отпечатано в 1 экземпляре.

Библиография 25 наименование.

« » _____
(дата)

(подпись)

Кадоркин Н.В.
(ФИО)

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАО ВО

«Сибирский федеральный университет»

институт

«Электроэнергетика»

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



Г. Н. Чистяков

подпись

инициалы, фамилия

« 25 »

06 20 18г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код — наименование направления

«Электропривод по системе ТВ–Г–Д с оптимальными обратными связями по
координатам объекта управления»

тема

Руководитель



16.06.18

подпись, дата

профессор, д.т.н.

должность, ученая степень

В.П.Кочетков

инициалы, фамилия

Выпускник

14.06.18

подпись, дата

Н.В.Кадоркин

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

16.06.18

подпись, дата

И.А.Кычакова

инициалы, фамилия

Абакан 2018